



UFRJ

Bruno Werner Penkuhn**A BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ E SEU POTENCIAL EXPLORATÓRIO PARA
HIDROCARBONETOS COM ÊNFASE NOS RESULTADOS DA SÍSMICA DE
REFLEXÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Programa de Pós-graduação
em Geologia, Instituto de Geociências, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, como requisito necessário à
obtenção do grau de Especialista em
Geofísica do Petróleo.

Orientadores:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes
Webe Mansur

Rio de Janeiro

Março de 2007

M
GL
P411B

UFRJ	
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza Biblioteca Central	
N.º REGISTRO	DATA
7072112	26/01/2012
ORIGEM <i>Doação / UFRJ-Dgp de Geologia</i>	

Penkuhn, Bruno Werner

A BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ E SEU POTENCIAL EXPLORATÓRIO PARA HIDROCARBONETOS COM ÊNFASE NOS RESULTADOS DA SÍSMICA DE REFLEXÃO/ Bruno Werner Penkuhn - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2007.

x, 74p. : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia, 2007.

Orientadores: Leonardo Fonseca Borghi de Almeida, Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes, Webe Mansur

1. Geofísica. 2. Geologia de Engenharia e Ambiental – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Título.

Bruno Werner Penkuhn

A BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ E SEU POTENCIAL EXPLORATÓRIO PARA
HIDROCARBONETOS COM ÊNFASE NOS RESULTADOS DA SÍSMICA DE
REFLEXÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Programa de Pós-graduação
em Geologia, Instituto de Geociências, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, como requisito necessário à
obtenção do grau de Especialista em
Geofísica do Petróleo.

Orientadores:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes
Webe Mansur

Aprovada em: 28 de março de 2007

Por:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida (UFRJ)

Álvaro Lúcio de Oliveira Gomes (Petrobras)

Webe Mansur (UFRJ)

Agradecimentos

Agradeço a Deus por haver-me permitido chegar até aqui.

Agradeço à minha esposa, Mônica Teresa da Mota Soriano Penkuhn, por todo o apoio dado durante o curso de especialização.

Agradeço a todos os professores da UFRJ que efetivamente colaboraram com orientações, ao orientador da Petrobras, Álvaro Gomes e a todos os colegas da Petrobras que deram sugestões para o presente trabalho.

Agradeço aos colegas de curso de especialização Érika Medeiros de Siqueira, Helder Silvério Borba e Rommel Melhor Mendes por toda a ajuda recebida.

Resumo

PENKUHN, Bruno Werner. **A bacia sedimentar do Paraná e seu potencial exploratório para hidrocarbonetos com ênfase nos resultados da sísmica de reflexão**. 2007. xi 73 Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A bacia sedimentar do Paraná ocupa uma vasta área do território brasileiro, mais precisamente 1.000.000 km². Apesar desta grande extensão em área e dos diversos estudos geológicos e geofísicos nela realizados, a sua contribuição para a produção de hidrocarbonetos é muito pequena quando comparada a outras bacias também situadas em território brasileiro. Atribui-se tradicionalmente este fato aos basaltos que a recobrem, isto porque este capeamento dificultaria ou até mesmo inviabilizaria a aplicação do método sísmico. Mesmo assim, foram encontradas quantidades subcomerciais de óleo e gás. Existe também o aproveitamento econômico do folhelho pirobotuminoso, o qual, depois de devidamente tratado, gera hidrocarbonetos. O presente trabalho visa reunir boa parte da informação disponível na literatura sobre esta bacia e estudar a aplicabilidade ou não do método sísmico de reflexão aplicado à pesquisa de hidrocarbonetos na mesma.

Palavras-chave: Geofísica; Geologia; Petróleo e gás; Bacia do Paraná.

Abstract

PENKUHN, Bruno Werner. **The Parana sedimentar basin and its exploration potential for hidrocarbons with emphasis in the results of reflection seismic.** 2007. xi 73 Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geofísica do Petróleo) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Parana's sedimentary basin occupies a vast area of the Brazilian territory, more exactly 1.000.000 Km². In spite of that great extension of area and of the various geological and geophysique studies made in that area, it's contribution for the production of hydrocarbon is very smal compared of other basins also situated in Brazilian territory. Traditionaly that fact is attributed of the basalt that cover it, that is because of this cover would make difficult or even make impossible the application of the seismic method. Even though, were found quantities subcommercials of oil and gas. There's also the economic utilization of the pirobituminous shale, which, after being properly treated, produces hydrocarbon. The present study intends to gather a great part of the available information in literature about that basin and to study the application or not of the seismic reflection's method applied to the research of hydrocarbon in that same basin.

Key-Words: Geophysics; Geology; Oil and Gas; Parana Basin

Lista de figuras

FIGURA 1: localização da Bacia do Paraná.....	2
FIGURA 2: seção geológica esquemática da Bacia do Paraná.....	6
FIGURA 3: diagrama estratigráfico da Bacia do Paraná.....	10
FIGURA 4: arcabouço estrutural da bacia do Paraná.....	14
FIGURA 5: alinhamento dos enxames de diques.....	15
FIGURA 6: aspecto geotectônico do embasamento da bacia do Paraná.....	16
FIGURA 7: estruturas da bacia do Paraná.....	18
FIGURA 8: distribuição espacial das fases deposicionais da bacia do Paraná...	20
FIGURA 9: mapa geológico simplificado da bacia do Paraná.....	23
FIGURA 10: campo de produção no centro do Estado do Paraná.....	28
FIGURA 11: ciclos deposicionais do Grupo Itararé.....	29
FIGURA 12: geofones.....	33
FIGURA 13: disposição dos equipamentos para aquisição sísmica terrestre.....	35
FIGURA 14: exemplo de aquisição sísmica com redundância.....	36
FIGURA 15: conversão do sinal sísmico em sismograma ideal.....	39
FIGURA 16: correção de NMO.....	42
FIGURA 17: análise de velocidades.....	43
FIGURA 18: resumo do processamento sísmico.....	44
FIGURA 19: exemplo de técnica de migração.....	45
FIGURA 20: seções migradas e não migradas.....	46

FIGURA 21: correlação de um poço com uma seção sísmica.....	49
FIGURA 22: localização das equipes sísmicas citadas no presente trabalho.....	52
FIGURA 23: linha sísmica obtida na região de Cuiabá Paulista.....	53
FIGURA 24: linha sísmica obtida na área de Rio Vorá.....	54
FIGURA 25: seções sísmicas com e sem deconvolução.....	60
FIGURA 26: linha sísmica obtida na região de Cuiabá Paulista.....	61

Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	v
<i>Abstract</i>	vi
Lista de figuras	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVO.....	4
3 MÉTODO.....	5
4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA.....	6
4.1 Estratigrafia.....	6
4.2 Geologia estrutural.....	11
4.3 História geológica.....	15
4.4 Geologia do petróleo.....	23
4.4.1 HIDROCARBONETOS SINTÉTICOS.....	23
4.4.2 HIDROCARBONETOS NATURAIS.....	24
5 O MÉTODO SÍSMICO.....	30
5.1 Introdução.....	30
5.2 Aquisição sísmica.....	31
5.3 Resolução sísmica.....	36
5.4 Razão sinal/ruído.....	37
5.5 Processamento para sísmica de reflexão.....	37
5.5.1 Demultiplexação.....	38

5.5.2 Recuperação do ganho.....	38
5.5.3 Deconvolução dos efeitos instrumentais.....	39
5.5.4 Correção de absorção.....	40
5.5.5 Correção de divergência esférica.....	40
5.5.6 Ordenação em famílias CMP.....	40
5.5.7 Deconvolução preditiva.....	40
5.5.8 Atenuação de múltiplas.....	41
5.5.9 Análise de velocidade juntamente com correção de NMO.....	41
5.5.10 Correção de DMO.....	42
5.5.11 Empilhamento horizontal.....	43
5.5.12 Deconvolução após empilhamento.....	43
5.5.13 Migração após empilhamento.....	45
5.5.14 Filtro variável com o tempo.....	46
5.5.15 Filtro de coerência.....	46
5.5.16 Aplicação de ganho.....	47
5.5.17 Seção final.....	47
5.5.18 Correções estáticas.....	47
5.6 Interpretação.....	48
6 APLICAÇÃO DO MÉTODO SÍSMICO NA BACIA DO PARANÁ.....	50
6.1 Parâmetros utilizados na aquisição.....	51
6.2 Processamento.....	55
6.3 Qualidade dos dados.....	58
6.4 Sugestões para melhorar a resolução sísmica.....	62
7 CONCLUSÃO.....	65
APÊNDICE A - NOÇÕES DE TEORIA DA ELASTICIDADE.....	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

A bacia sedimentar do Paraná, situada no centro-Leste da América do Sul, ocupa uma área de 1.600.000 km², sendo 1.000.000 km² em território brasileiro. Os outros 600.000 km² estão distribuídos entre Argentina (400.000 km²), Uruguai e Paraguai (100.000 km² cada um). O trecho brasileiro da bacia cobre a maior parte dos Estados do Rio Grande do Sul, de Santa Catarina, do Paraná e de São Paulo, além de partes dos Estados de Minas Gerais, de Mato Grosso do Sul, de Mato Grosso e de Goiás (FIGURA 1). Entre Morro do Convento (SC) e Torres (RS) a bacia do Paraná chega ao litoral e estende-se pela plataforma continental (PETRI & FÚLFARO, 1988).

Segundo SANTOS *et al.* (1984), a espessura total dos sedimentos da bacia ainda não foi determinada, porém acredita-se que seja de 4.500 m a 5.000 m ou até mais. Já MILANI *et al.* (1990) afirma que a espessura dos sedimentos excede 7.000 m.

Tanto PETRI & FÚLFARO (1988) quanto SANTOS *et al.* (1984) concordam em classificar a bacia do Paraná como sendo uma bacia intracratônica.

Quanto ao potencial para hidrocarbonetos, a bacia do Paraná já produz hidrocarbonetos sintéticos através do processamento de folhelho pirobetuminoso da Formação Irati (MILANI *et al.*, 2003), o qual é erroneamente chamado de xisto. Afora isto, foram encontrados óleo e gás subcomerciais na formação Rio Bonito e no grupo Itararé (MILANI *et al.*, 1990).



FIGURA 1: Localização da Bacia do Paraná (ZALÁN et al., 1991).

Até 1990 foram adquiridos 22.000 km de linhas sísmicas de reflexão (MILANI *et al.*, 1990). Levando-se em conta as dimensões da bacia (1.000.000 km², conforme mencionado acima), isto equivale a dizer que foram levantados em média 22 quilômetros de linhas sísmicas por mil quilômetros quadrados. Ou seja, muito pouca sísmica foi levantada na área em estudo, ainda mais levando-se em conta que se trata de uma técnica fundamental para a prospecção de hidrocarbonetos.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é efetuar uma caracterização geológica da bacia sedimentar do Paraná por meio de um levantamento bibliográfico e analisar o uso da sísmica de reflexão nesta mesma bacia, também utilizando dados bibliográficos. As questões que se levantam são: será possível, com o uso da tecnologia atual, obter boas seções sísmicas mesmo debaixo de um espesso recobrimento de basalto? Será a baixa qualidade dos dados sísmicos a razão das escassas descobertas de hidrocarbonetos nesta bacia? Ou serão as condições geológicas, ou seja, ausência de acumulações significativas de hidrocarbonetos? Pode-se dizer que o objetivo do presente trabalho é tentar responder às perguntas acima.

3 MÉTODO

O método utilizado no presente trabalho consistiu basicamente em levantamento bibliográfico e análise das informações assim obtidas.

Primeiramente foram consultadas as seguintes obras sobre a geologia do Brasil: MILANI & ARAÚJO (2003), PETRI & FÚLFARO (1988) e SANTOS *et al.* (1984), as quais serviram para delinear um panorama geral sobre a bacia em estudo.

Em seguida foram consultadas as obras específicas sobre a bacia em estudo, como as de BORGHI (2002), MILANI & ZALÁN (1999), MILANI *et al.* (1990), FRANÇA & POTTER (1991) e HAWKESWORTH *et. al* (2000). BORGHI (2002) reforça os dados gerais sobre a bacia em estudo. HAWKESWORTH *et. al* (2000) fornece dados sobre a relação entre a geologia estrutural e o magmatismo ocorrido na bacia. As últimas três obras citadas fornecem dados sobre a geologia do petróleo na região.

Foram também consultadas obras sobre o método sísmico: YILMAZ (2001), TELFORD *et. al.* (2004), DUARTE (2003) e FERNANDES (1984). Tais obras serviram para discussão sobre o método sísmico.

Por fim utilizou-se o trabalho de SILVA & VIANNA (1982) como caso de estudo da aplicação do método sísmico na bacia sedimentar do Paraná.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA

4.1 Estratigrafia

Seis grandes seqüências deposicionais, que variam em idade do Ordoviciano ao Cretáceo, constituem a estratigrafia da Bacia do Paraná: ordovício-siluriana, devoniana, carbonífera-eotriássica, neotriássica, jurássica-eocretácea e neocretácea (MILANI *et al.*, 1994). As três primeiras correspondem a grandes ciclos transgressivo-regressivos paleozóicos e as demais são formadas de rochas sedimentares de natureza continental e ígneas associadas (ver figura 2). Na figura 3, vê-se o diagrama estratigráfico da bacia, mostrando a distribuição temporal e espacial das principais unidades litológicas em uma seção NW-SE. Neste diagrama também estão associados os eventos tectônicos e os ambientes deposicionais que afetaram a evolução da bacia.

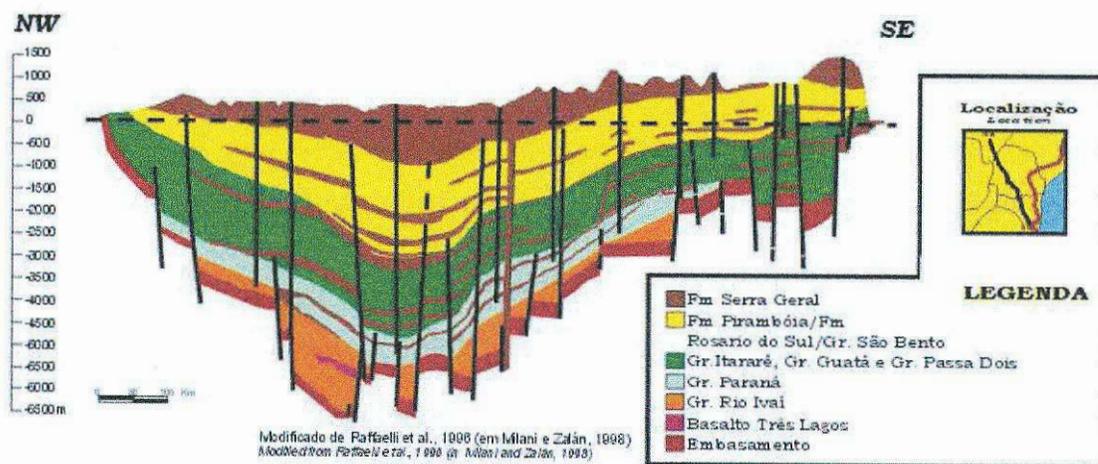


FIGURA 2: Seção geológica esquemática da Bacia do Paraná (www.anp.gov.br)

O Grupo Rio Ivaí, correspondente litoestratigráfico da seqüência ordovício-siluriana (ASSINE *et al.*, 1994), tem idade entre o Neo-Ordoviciano e o Eossiluriano. Iniciada por um pacote arenoso (*Formação Alto das Garças*) com até 300 m de espessura, é seguida por algumas dezenas de metros de diamictitos (*Formação Iapó*) e culmina com pelitos fossilíferos (*Formação Vila Maria*), que constituem um importante *datum* cronoestratigráfico no estudo da seqüência. A unidade superior deste ciclo, *Formação Vila Maria*, também documenta a primeira grande incursão marinha na bacia.

A seqüência devoniana depositou-se, em discordância, sobre a seqüência ordovício-siluriana e corresponde litoestratigraficamente ao Grupo Paraná, que ocorre nas porções central e norte da bacia e é constituído pelas *formações Furnas e Ponta Grossa*.

A Formação Furnas é representada por uma unidade basal arenosa com marcante homogeneidade litológica e apresenta estratificações cruzadas em sua maioria acanaladas de um ambiente continental fluvial. A Formação Ponta Grossa, por sua vez, é constituída de folhelhos com subordinados siltitos e arenitos deltaicos com marcas onduladas e bioturbado, o que indica deposição predominante em ambiente marinho raso.

A sedimentação na bacia do Paraná foi inibida durante um longo período (do Eocarbonífero ao Neocarbonífero), gerando a discordância regional de maior hiato em seu registro litológico (cerca de 45 Ma). Esta inibição foi causada por uma conjunção de fatores climáticos e tectônicos que atuaram sobre uma ampla área da margem meridional do Gondwana. A inexistência do registro sedimentar nesta

época foi condicionada pelo desenvolvimento de calotas de gelo, associado à epirogênese positiva.

Ainda sob marcante influência do clima glacial, foi acumulada a seção basal da seqüência carbonífera-eotriássica, onde se encontram as rochas glaciogênicas do *Grupo Itararé* (na porção sul da bacia) e *Formação Aquidauana* (na parte norte). São diamictitos, folhelhos, arenitos e conglomerados com espessura total de 1500 m. Após esta seção depositou-se um pacote transgressivo, tendo sido este o caráter de sedimentação devido à deglaciação e conseqüente subida do nível do mar. Este pacote inclui a *Formação Rio Bonito* (formada por arenitos deltaicos com carvão), a *Formação Palermo* (constituída de deposição de folhelhos e siltitos) e a *Formação Irati* (com folhelhos betuminosos e carbonatos). Esta última formação é caracterizada por uma faciologia bastante complexa que indica uma geometria de bacia igualmente complexa, com golfos e baías de profundidades e salinidades bastante variáveis. O intervalo superior da seqüência carbonífera-eotriássica é formado pelas *formações Teresina, Rio do Rastro e Corumbataí*. Neste intervalo é documentada a progressiva continentalização a que foi submetida a Bacia do Paraná. A Formação Teresina é constituída de argilito e siltito cinza-claro, depositados sob a ação de ondas e marés enquanto que a Formação Rio Rastro é formada por arenitos, siltitos e folhelhos arroxeados, avermelhados e esverdeados e é interpretada como resultante do avanço de sistemas deltaicos a partir da borda leste da bacia. A Formação Corumbataí, na parte norte da bacia, constitui-se de sedimentos areno-argilosos cronoequivalentes aos das formações Teresina e do Rio do Rastro.

As *formações Pirambóia e Rosário do Sul* constituem a seqüência neotriássica e são formadas por arenitos com estratificação cruzada acanalada e planar, o que

indica deposição em ambientes lacustre rasos e localizados, gerada por sistemas flúvio-eólicos.

A *Formação Botucatu* foi formada por gigantescos campos de dunas que dominaram a bacia no Neojurássico, estes seguidos do mais volumoso episódio de extravasamento de lavas do planeta, que deu origem à *Formação Serra Geral*. Estas duas unidades em conjunto constituem a seqüência jurássica-eocretácea.

A seqüência que encerraria a história deposicional da bacia é a seqüência neocretácea que corresponde, em termos litográficos, aos *grupos Bauru e Caiuá*. É um pacote com até 280 m de espessura de depósitos continentais incluindo conglomerados, arenitos, siltitos, argilitos e caliche. Esta seqüência ocupou a depressão gerada pela carga de derrames vulcânicos (último episódio significativo de subsidência da bacia) e apresenta estratificações cruzadas acanaladas e feições de corte-e-preenchimento.

As unidades sedimentares mais novas, as *formações Cachoeirinha* (ao norte) e *Tupanciretã* (ao sul da bacia), essencialmente arenosas e de idade terciária, não são consideradas como pertencentes à Bacia do Paraná.

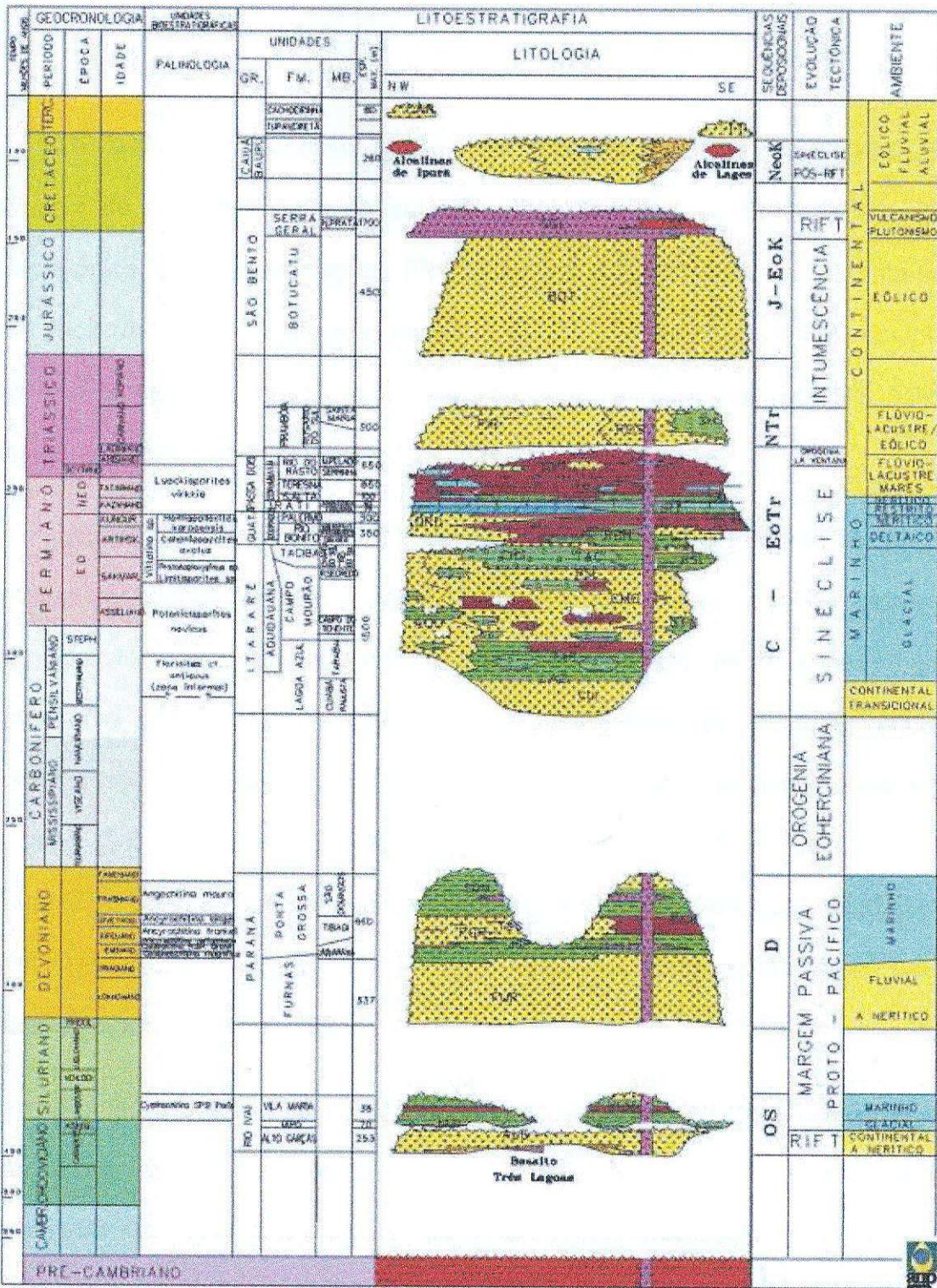


FIGURA 3: Diagrama estratigráfico da Bacia do Paraná. Fonte: ANP via <http://www.anp.gov.br>

4.2 Geologia estrutural

BORGHI (2002) menciona a discussão sobre qual seria a classificação exata da bacia do Paraná. Todos os autores concordam que se trata de uma bacia intracratônica, porém para alguns (FIGUEIREDO & GABAGLIA, 1986) trata-se de uma bacia de interior cratônico, para outros (FÚLFARO *et al.*, 1982) de interior cratônico composta e outros ainda (MILANI, 1997 e MILANI & RAMOS, 1998) a consideram como sendo cratônica marginal.

Segundo ZALÁN *et al.* (1987), os limites atuais da bacia podem ser de mera natureza erosional ou de origem tectônica, ou seja, grandes arcos ou soerguimentos. No primeiro caso os sedimentos simplesmente afinam ou são suavemente afinados por erosão, sem a interferência de qualquer atividade tectônica maior. Isto aparenta ser o caso da borda Nordeste da bacia, entre a zona de falha Guapiara e o arco de Goiânia/Alto Paranaíba (FIGURA 4). O limite Noroeste da bacia é o cinturão de dobramentos do Paraguai/Araguaia, de idade Pré-Cambriano Superior/Ordoviciano, o qual provavelmente agiu como barreira topográfica para a sedimentação.

Segundo ZALÁN *et al.* (1987), o segundo caso, isto é, erosão decorrente de ação de grandes arcos ou soerguimentos, é o mais comum. A borda Oeste da bacia é o arco de Assunção, que é uma extensa flexura do embasamento, com direção N-S, que atravessa o Paraguai e a parte ocidental do estado do Mato Grosso do Sul, no Brasil (FIGURA 4). Esta feição foi criada no início da história da Bacia do Paraná, provavelmente no Devoniano Inferior, como resposta flexural da crosta aos primeiros movimentos orogênicos da margem ocidental da América do Sul. Ao

serem empurrados e empilhados, os pacotes de rocha da margem convergente da América do Sul geraram um arco flexural situado mais ao interior do continente. Sua localização presente é uma resposta aos eventos orogênicos do Mesozóico/Cenozóico, sendo que seu eixo deve ter migrado com o tempo, provavelmente de Oeste para Leste. Esta deve ser a razão da suave assimetria da Bacia do Paraná, com um flanco ocidental mais "abrupto" ($1^\circ - 4^\circ$, próximo ao arco de Assunção) e um flanco oriental mais suave ($0,5^\circ - 1^\circ$).

Segundo ZALÁN *et al.* (1987), o limite Norte da bacia é o arco de Goiânia/Alto Paranaíba, com direção NW, que é outra flexura crustal com forte resposta aeromagnetométrica, ao longo da qual foram intrudidos vários corpos alcalinos e Kimberlíticos. Outros dois arcos de direção NW são de extrema importância na configuração da Bacia do Paraná (vide FIGURA 4). O arco de Ponta Grossa criou uma notável reentrância na borda oriental da bacia, no estado do Paraná, enquanto que o arco do Rio Grande originou uma reentrância similar no estado do Rio Grande do Sul. A extensão Noroeste do arco do Rio Grande se une a uma ramificação do arco de Assunção, formando o limite meridional da bacia. Todos estes arcos NW são, provavelmente, expressões de falhas antigas e profundas, especialmente os arcos de Goiânia/Alto Paranaíba e Ponta Grossa. Ambos têm respostas aeromagnetométricas expressivas, o que indicaria a presença de espessos diques de diabásico, derivados do manto, que teriam sido os alimentadores dos derrames mesozóicos. O seu paralelismo em torno da direção $N55^\circ W$ é uma indicação clara da sua origem tectônica, já que esta é uma das duas mais importantes direções de trendes de falhas e lineamentos na bacia. Seu desenvolvimento completo teve lugar no Mesozóico. Os citados autores não descartam, entretanto, a interpretação que

relaciona estes arcos a respostas flexurais da costa à sobrecarga dos sedimentos na Bacia do Paraná.

Segundo ZALÁN *et al.* (1987), houve um outro evento tectônico influente nos limites orientais da bacia, o soerguimento da Serra do Mar. Ele se iniciou, aproximadamente, no Turoniano, prosseguindo até épocas recentes, tendo afetado toda a região Sudeste do Brasil e sendo derivado de pulsos tectônicos recorrentes (BACOCOLI & ARANHA, 1984, apud ZALÁN *et al.*, 1987). Este efeito é facilmente deduzido a partir do limite erosional das isópacas de lavas (vide adiante) e pela observação das diferentes elevações dos derrames de lavas nos estados do Paraná e Santa Catarina (próximo de 1.000 m) e Rio Grande do Sul, no eixo do sinclinal de Torres (ao nível do mar). A causa deste soerguimento é pouco compreendida, mas parece estar relacionada à separação entre a América do Sul e a África. Qualquer tentativa de explicá-la deverá levar em conta o relacionamento temporal entre o seu início (Turoniano) e a fase rifte da ruptura continental (135 – 115 Ma).

Quanto às intrusões ígneas, existem duas direções preferenciais de alinhamento (figura 5): N-S e NW-SE (HAWKESWORTH *et al.*, 2000). A primeira é diretamente relacionada ao rifte da abertura do Atlântico Sul. A segunda é paralela às bacias de Salados e Colorado na Argentina, bacias estas que foram controladas pelo rifteamento mesozóico.

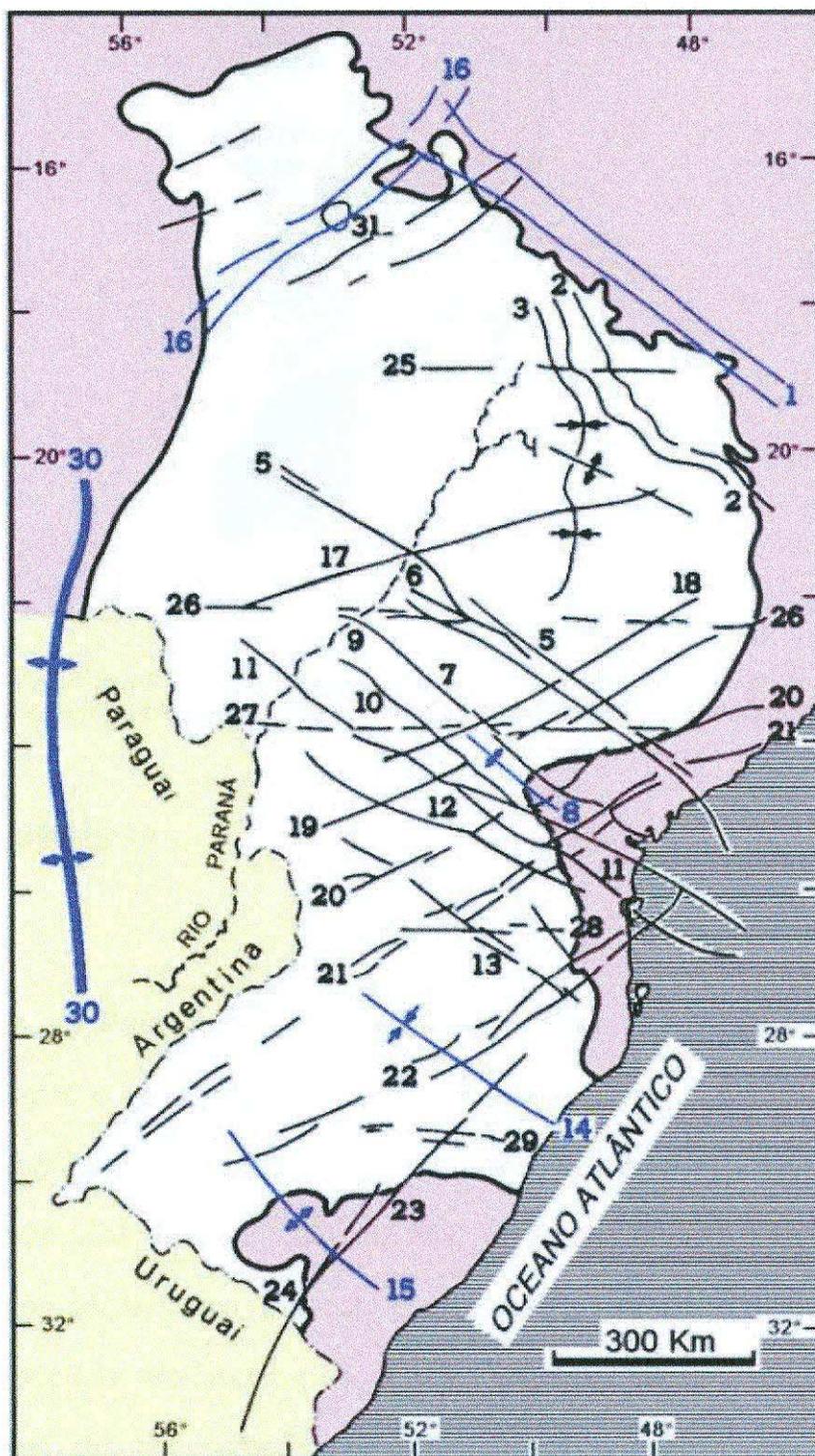


FIGURA 4: Arcabouço estrutural da bacia do Paraná segundo ZALÁN et al (1991). As principais feições são: 1) Arco do Alto Paranaíba 5) Zona de falha Guapiara 8) Arco de Ponta Grossa 14) Sinclinal de Torres 15) Arco do Rio Grande 16) Zona de falha do Transbrasiliiano 30) Arco de Assunção.

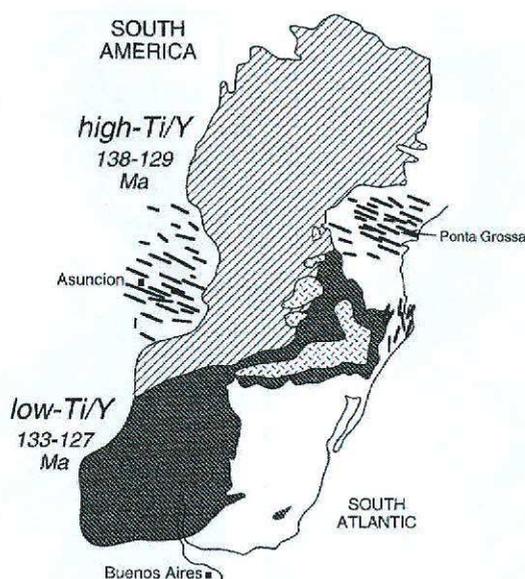


FIGURA 5: Alinhamento dos enxames de diques associados ao rifte da abertura do Atlântico Sul (N-S) e dos relacionados a falhamentos mesozóicos (NW-SE). (HAWKESWORTH *et al.*, 2000)

4.3 História geológica

A Bacia do Paraná se desenvolveu sobre área de escudo do continente Gondwana, após o golfo original aberto para o Sul (Oceano Panthalassa) ter se fechado progressivamente, tornando-a uma depressão intracratônica no paleocontinente (ZALÁN *et al.* 1990, MILANI, 1992 *apud* MILANI e RAMOS, 1998). Seu arcabouço geotectônico, proposto por MILANI e RAMOS (1998), é composto por quatro núcleos cratônicos (Rio Aporé, Triângulo Mineiro, Guaxupé e Rio Paranapanema) circundados por vários cinturões móveis do Brasileiro (figura 6 (B)). Essa teoria é mais complexa que aquela apresentada por ZALÁN *et al.* (1987) sobre o provável núcleo cratônico (FIGURA 6 (A)).

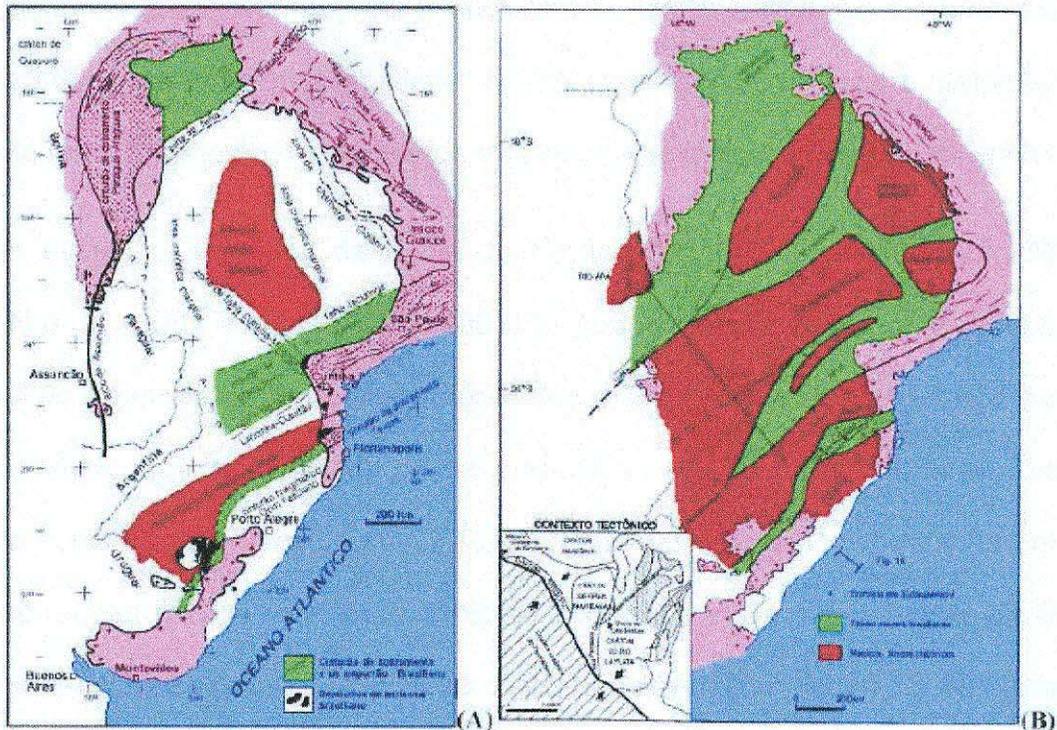


FIGURA 6: Aspecto geotectônico do embasamento da bacia do Paraná segundo (A) ZALÁN *et al* (1991) e (B) MILANI & RAMOS (1998). (BORGHI, 2002).

A Bacia do Paraná, apesar de se situar em área cratônica, sofreu influências da tectônica em áreas adjacentes, no contexto do Gondwana Sul-ocidental, e, por conseguinte, seu desenvolvimento recebeu influência dos esforços compressivos originados na margem ativa do paleocontinente (CAMPOS *et al.*, 1998). Isto é, ela se desenvolveu sobre a área cratônica do Gondwana, mas ao lado da zona móvel dos Gondwanides, experimentando, portanto, uma influência dos esforços compressivos originados pela convergência de placas ao longo da faixa de colisão que se localizava na região meridional do paleocontinente (MILANI & RAMOS, 1998).

Segundo ZALÁN *et al.* (1987), existem dois estilos estruturais em toda a Bacia do Paraná: deformações associadas a intrusões ígneas básicas e deformações associadas à reativação de elementos tectônicos lineares com direção NE e NW.

A evolução estrutural da Bacia do Paraná segundo ZALÁN *et al.* (1987) e ZALÁN *et al.* (1991 *apud* BORGHI, 2002) foi controlada por zonas de fraqueza pré-existentes do embasamento dissipadoras dos esforços intraplaca. Ao longo dessas zonas, houve movimentação de blocos durante a evolução da Bacia, tanto verticais quanto horizontais. De acordo com ZALÁN *et al.* (1987), tais movimentos não teriam sido de grande escala, mas foram suficientes para controlar a distribuição de fácies sedimentares. A atividade tectônica no contexto de área intraplaca está basicamente restrita às reativações de falhamentos do embasamento da Bacia. Este é o mecanismo através do qual os esforços intraplaca, criados pela movimentação das placas e dos eventos orogênicos associados às margens delas, são dissipados. Essas estruturas cratônicas pré-existentes são divididas em três grupos de lineamentos, segundo ZALÁN *et al.* (1987), conforme a sua orientação: NW-SE, NE-SW e E-W.

O padrão estrutural dos lineamentos NE-SW caracteriza-se por zonas de falha constituídas por uma única falha larga ou por uma zona de falha retilínea, segundo ZALÁN *et al.* (1987), em geral, sem intrusões de diabásio, porém com estruturas associadas a movimentos transcorrentes, embora esses também ocorram ao longo dos lineamentos NW. Não há maiores diferenças entre as zonas de falha NW e NE, tendo ambas influenciado bastante a sedimentação de várias unidades estratigráficas, cada uma em uma época distinta.

Os lineamentos NW-SE são provavelmente mais antigos que os de direção NE-SW. De idade arqueana, essas zonas de falha foram reativadas no Jurássico-Cretáceo durante a fase rifte, apresentando um padrão estrutural retilíneo, com concentração de falhas e diques de diabásio, formando extensa zona de falhas, às vezes mais larga ou mais estreita. Esse evento tectono-magmático que reativou essas falhas de direção NW-SE foi o mais forte entre aqueles que afetaram a Bacia do Paraná (ZALÁN *et al.*, 1987). Entre as estruturas NW, destaca-se o Arco de Ponta Grossa (figura 7), que é formado por diques de rochas básicas desde o litoral Sul de São Paulo até o interior do Paraná.

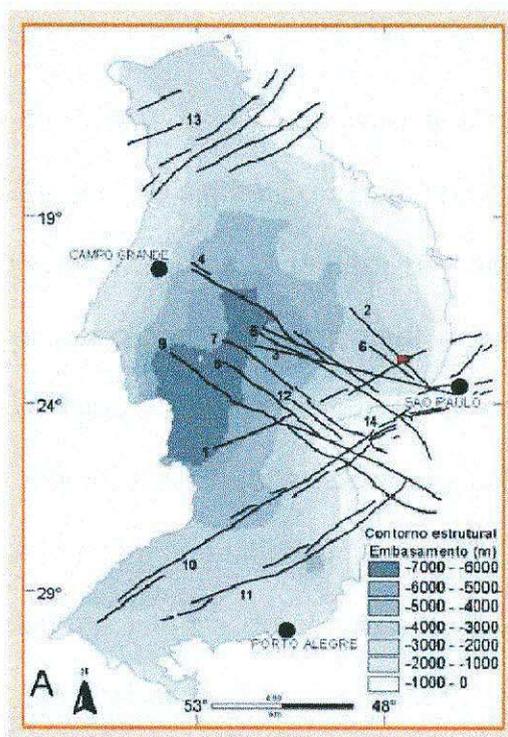


FIGURA 7: Estruturas da bacia do Paraná. Falha de Jacutinga, 2- lineamento Tietê, 3- lineamento Paranapanema, 4- falha de Guapiara, 5- falha Santo Anastácio, 6- lineamento Barra Bonita – Itu, 7- falha São Jerônimo – Curiúva, 8- falha rio Alonzo, 9- falha Cândido de Abreu – Campo Mourão, 10- zona de falha Lancinha – Cubatão, 11- zona de falha Blumenau – Soledade, 12- Arco de Ponta Grossa, 13 – zona de cisalhamento transbraziliiano, 14- zona de cisalhamento Ribeira. (ARAÚJO *et al.*, 2006).

Essas duas direções de lineamentos (NW e NE) representariam, para SOARES *et al.* (1982, apud ZALÁN *et al.*, 1987), áreas de maior mobilidade tectônica em comparação às áreas adjacentes. Esses elementos representariam zonas de fraqueza do embasamento e vários destes controlariam a sedimentação durante a evolução da Bacia.

Os lineamentos E-W, segundo ZALÁN *et al.* (1987), começaram no Triássico e são paralelos às zonas de fratura oceânica, o que indica uma possível ligação com o evento que culminou com o desenvolvimento do Atlântico Sul. Os estudos não são suficientes para a sua compreensão, mas eles podem ser identificados em mapas aeromagnetométricos.

A origem da Bacia do Paraná ainda é obscura, segundo ZALÁN, *et al.* (1987), não havendo evidências de um rifte central precursor sob a mesma, como ocorre em outras bacias intracratônicas interiores. Também não há indicações de eventos tectônicos que teriam provocado o afinamento crustal e a conseqüente subsidência, devendo ser ainda essa questão objeto de pesquisas. Um provável mecanismo para a subsidência que teria criado a depressão inicial que foi ocupada pela Bacia do Paraná, proposto por Cordani (em comunicado pessoal – ZALÁN *et al.*, 1987), seria o resfriamento de um ciclo de intensa deformação e granitogênese que deve ter espessado a litosfera com rochas supracrustais enriquecidas em radioisótopos, culminando no aumento do seu gradiente geotérmico. Iniciada a sedimentação, o próprio peso dos sedimentos, aliado ao resfriamento, seria a causa da subsidência que acolheu as seqüências posteriores.

A bacia do Paraná, ainda conforme ZALÁN *et al.* (1987), é na realidade o produto final da superposição, no tempo, de três diferentes bacias (figura 8), após

três fases principais de subsidência (Siluro-Devoniana, Permo-Carbonífera e a fase de lavas do Jurássico Superior/Cretáceo Inferior), com geometrias e limites distintos. Essas fases são separadas por períodos longos de erosão/não deposição ou de baixas taxas de sedimentação.

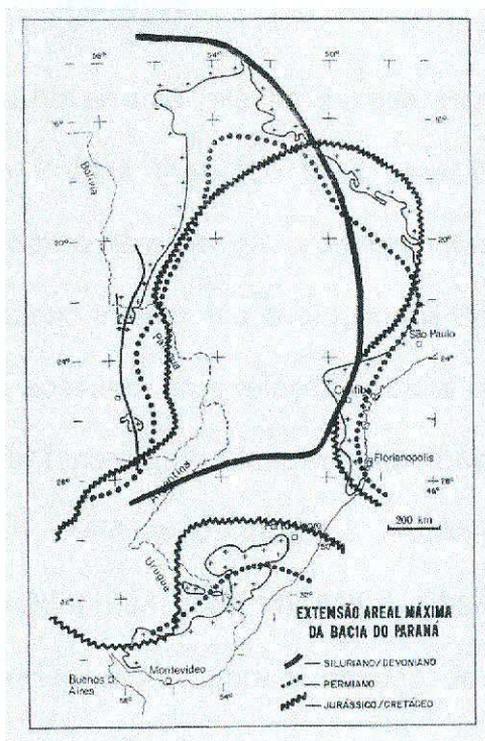


FIGURA 8: Distribuição espacial das três fases deposicionais da bacia do Paraná durante o Siluriano/Devoniano, Carbonífero/Permiano, e Jurássico/Cretáceo. (Fonte: ZALÁN, 1987).

A primeira fase se deu em regime compressional e foi responsável pela deposição das seqüências ordovício-silurianas e da seqüência transgressiva devoniana, que ocupou praticamente a mesma área. A segunda fase de subsidência, responsável pela seqüência carbonífera-eotriássica, começou após o Gondwana deixar o paleopólo Sul. A subsidência seria consequência do peso das geleiras continentais e da sobrecarga dos sedimentos do ciclo transgressivo-regressivo carbonífero-eotriássico. Uma orogenia subsequente cessaria a sedimentação com o

soerguimento crustal. No neotriássico, a sedimentação recomeçaria primeiro em um ambiente flúvio-eólico e, posteriormente, num grande deserto que cobriu toda a bacia e áreas adjacentes. Por fim, a terceira fase, correlacionável à seqüência juro-cretácica, coincide com o magmatismo basáltico, que deve ter sido o causador da subsidência devido ao peso das lavas.

Aventa-se que deve haver uma relação estreita entre o ciclo Brasileiro (700-450 Ma) e a Bacia do Paraná (440-120 Ma), uma vez que o início da sua sedimentação se deu com o término da orogenia citada. Portanto, o início da sedimentação no Ordoviciano inferior e a evolução da Bacia do Paraná no interior do continente Gondwana possuem uma relação estreita com o desenvolvimento de um grande cinturão móvel fanerozóico Gondwanides, que foi local de vários ciclos orogênicos (RAMOS *et al.*, 1986 *apud* MILANI & ZALÁN, 1999). Segundo MILANI (1997) e MILANI e RAMOS (1998 *apud* MILANI & ZALÁN, 1999), tais orogenias podem ter concorrido decisivamente para a criação do espaço de acomodação necessário para várias superseqüências que preencheram a Bacia do Paraná, bem como para a sua história deformacional (ZALÁN *et al.*, 1990 *apud* MILANI & ZALÁN, 1999).

Reconhecem-se seis superseqüências no registro estratigráfico, limitadas por expressivas discordâncias inter-regionais, correspondentes a três ciclos de sedimentação transgressivo-regressivos no Paleozóico e, outros três, a pacotes sedimentares continentais Mesozóicos com rochas ígneas associadas, de acordo com MILANI (1997, *apud* CAMPOS *et al.*, 1998), que constituem o preenchimento dessa Bacia. São elas: Superseqüência Rio Ivaí (ordovício-siluriana), Superseqüência Paraná (devoniana), Superseqüência Gondwana I (carbonífera-eotriássica), Superseqüência Gondwana II (meso-neotriássica), Superseqüência

Gondwana III (neojurássica-eocretácica) e Superseqüência Bauru (neocretácica). A primeira Superseqüência – Rio Ivaí - com 300 metros de espessura de areia encimada por folhelhos, registra a glaciação do Ordoviciano superior – Siluriano inferior do Gondwana. O pacote Devoniano referente à Superseqüência Paraná é composto pelos arenitos da Formação Furnas que são cobertos pelos folhelhos da Formação Ponta Grossa. A terceira superseqüência paleozóica, chamada Gondwana I, contém o maior volume de sedimentos entre todas as unidades de segunda ordem da Bacia do Paraná, com espessura de cerca de 2500 m. Representa um pacote complexo e heterogêneo sedimentologicamente, registrando as maiores mudanças paleoambientais através do tempo, as quais afetaram o Gondwana desde épocas glaciais no Carbonífero superior até os tempos secos e áridos do Triássico. As superseqüências mesozóicas são a Gondwana II (Meso-neotriássica), formada por camadas lacustrinas; Gondwana III (Neojurássica-eocretácea), representada por dunas eólicas da Formação Botucatu, com vasta distribuição regional no Triássico, seguidas do magmatismo basáltico do Eocretáceo da Formação Serra Geral. Por fim, a superseqüência Bauru, do Neocretáceo, um pacote de rochas sedimentares aluviais, fluviais e eólicas, encerra a história deposicional da Bacia do Paraná. (figura 9)

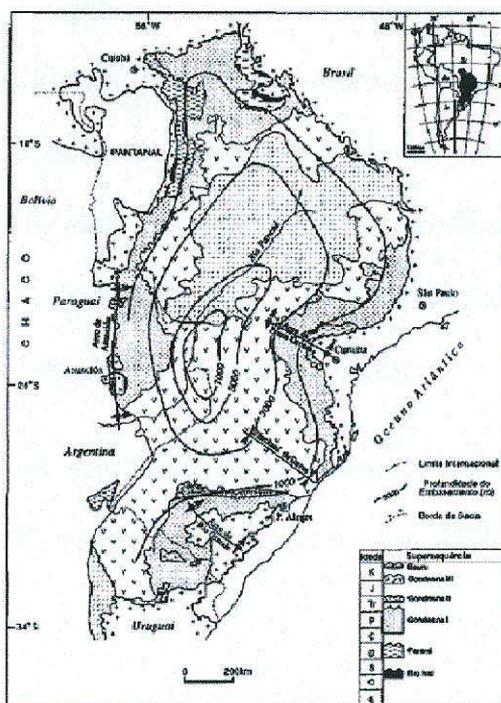


FIGURA 9: Mapa geológico simplificado da bacia do Paraná e distribuição no tempo das diversas unidades de seu registro estratigráfico (MILANI & RAMOS, 1998).

4.4 Geologia do petróleo

Quanto à produção de hidrocarbonetos, a bacia sedimentar do Paraná apresenta interesse por já ser utilizada para a produção de hidrocarbonetos sintéticos e por já haverem sido encontradas acumulações subcomerciais de hidrocarbonetos naturais.

4.4.1 HIDROCARBONETOS SINTÉTICOS

A bacia em estudo é utilizada para produzir petróleo sintético por meio do processamento de folhelho pirobetuminoso da Formação Irati, o qual é erroneamente chamado de xisto. O processo consiste basicamente no aquecimento

do citado folhelho. O querogênio presente no mesmo se transforma em óleo cru sintético, óleo este que pode ser processado numa refinaria de petróleo comum. A Petrobras realiza este processo (denominado Petrosix) em São Mateus do Sul (PR) (PETRI & FÚLFARO, 1988). Segundo MILANI & ARAÚJO, 2003, a produção de óleo é de 3.870 barris, a de gás combustível é de 120 toneladas, a de gás liquefeito é de 45 e a de enxofre é de 75 toneladas (dados de 2003).

Na citada região, as camadas de folhelho pirobetuminoso mergulham 15 metros por quilômetro em relação à horizontal (MOREIRA, 1981 apud PETRI & FÚLFARO, 1988).

4.4.2 HIDROCARBONETOS NATURAIS

Foram encontradas acumulações subcomerciais de óleo e gás na região da calha central da bacia do Paraná (MILANI *et al.*, 1990). Quanto à produção comercial, os dados oriundos do BDEP (<http://www.bdep.gov.br>) são contraditórios: indicam haver um campo de produção no Estado do Paraná (figura 4-9). Porém, ao consultar-se o anuário estatístico da ANP (em <http://www.anp.gov.br>) não consta a produção de um metro cúbico sequer de petróleo ou gás natural em terra no Estado do Paraná durante o período compreendido entre os anos de 2000 e 2007.

Segundo MILANI & ZALÁN (1991), existem dois sistemas petrolíferos atuando na citada bacia:

- 1) O que tem como rocha geradora os folhelhos negros da formação Ponta Grossa e cujas rochas reservatórios são os arenitos do grupo Itararé e,

secundariamente, os da formação Rio Bonito. Os primeiros são selados por soleiras (sils) de diabásio e os segundos o são por rochas argilosas.

2) O que tem como rocha geradora os folhelhos da formação Irati e cujas rochas reservatório são os arenitos da formação Rio Bonito e também os da formação Pirambóia. Os primeiros são selados por rochas argilosas e os segundos o são por derrames basálticos.

Ainda segundo MILANI & ZALÁN (1991), a maturação de ambos os sistemas não é convencional, isto é, não se deveu ao simples soterramento, mas foi fortemente influenciada pelo calor oriundo das intrusões de diabásio.

Segundo MILANI *et al.* (1990), pode existir mais um sistema petrolífero na bacia do Paraná:

3) Um sistema petrolífero que teria como rocha geradora os folhelhos da formação Vila Maria e cujas rochas reservatório seriam os arenitos das formações Rio Ivaí e Furnas e do grupo Itararé. Cabe mencionar que a correlata Paraguaia da formação Vila Maria (folhelhos Vargas Pena) é responsável por indícios de óleo e gás naquele país.

Segundo MILANI *et al.* (1990), há ocorrências de óleo e gás nos Estados de Santa Catarina, do Paraná e de São Paulo, todas elas na região da calha central da bacia do Paraná. Na citada região é que estão as maiores espessuras do pacote vulcano-sedimentar em toda a bacia.

Na calha central da Bacia do Paraná, a formação Vila Maria está, segundo a mesma fonte, soterrada a grandes profundidades, em condições de gerar hidrocarbonetos gasosos (MILANI *et al.*, 1990). Foram encontrados gás e

condensado produzidos pela formação Ponta Grossa na região da calha central, a mesma fonte. Já a formação Irati estaria, ainda segundo a mesma fonte, dentro da janela de geração de óleo, devido ao soterramento adequado. Afora isto, nesta região, a formação Irati não foi intrudida pelos diabásios da formação Serra Geral, ou seja, a situação é particularmente boa para a geração de óleo, ainda segundo MILANI *et al.* (1990).

Relativamente às rochas reservatório, a situação também é favorável na região da calha central da Bacia do Paraná. (MILANI *et al.*, 1990).

Os arenitos das formações Rio Ivaí e Furnas, assim como os do grupo Itararé, possuem características de reservatórios apenas regulares, com porosidades variando de 6% a 16%, suficientes para acumulações comerciais de gás e condensado. Em Cuiabá Paulista, arenitos do grupo Itararé, com 9 % de porosidade, produziram gás com uma vazão de 51.000 m³/dia (MILANI *et al.*, 1990). Os arenitos ortoquartzíticos da formação Rio Bonito surpreendem por suas características permoporosas na mesma região. No poço estratigráfico Altônia n/1, perfurado pela PAULIPETRO, os mesmos apresentaram 150 m de espessura total e porosidades da ordem de 20%, excepcionalmente altas para a profundidade de 4.000 m em que ocorrem. No citado posto ocorreu a produção de água por surgência, o que comprova as boas condições de pressão e transmissibilidade dos arenitos ortoquartzíticos da formação Rio Bonito.

Segundo FRANÇA & POTTER (1991), o Grupo Itararé seria um potencial reservatório para hidrocarbonetos porque está situado logo acima dos folhelhos da formação Ponta Grossa (devoniana), folhelhos estes que são potenciais geradores de hidrocarbonetos. O citado grupo apresenta arenitos com boas qualidades para

reservatório e está selado por argilitos com seixos, siltitos e, possivelmente, intrusões de diabásio.

Ainda segundo FRANÇA & POTTER (1991), o grupo Itararé é subdividido em três ciclos deposicionais principais (figura 11). Os ciclos inferior e superior são bem definidos em toda a bacia. O ciclo intermediário, entretanto, pode apresentar seqüências granodecrescentes ou granocrescentes para o topo, ou então pode apresentar corpos de areia maciça com mais de 300 m de espessura, tornando a correlação estratigráfica difícil. A porosidade média dos arenitos do grupo Itararé é de 8%, porém foram encontrados valores superiores a 20%.

É interessante notar que, ao observar a figura 11, percebe-se que os ciclos deposicionais do grupo Itararé têm, na sua base, rocha armazenadora (arenito) e, no seu topo, rocha selante (argilito com seixos), o que é uma condição favorável para gerar acumulações de hidrocarbonetos.

Segundo YOSHIDA & GAMA (1982), os basaltos e diabásios presentes na bacia sedimentar do Paraná também favorecem as acumulações de hidrocarbonetos, pois forneceram calor para a sua geração. Além disto, os diabásios fraturados podem se tornar rochas armazenadoras. Em Cuiabá Paulista, uma zona de 15 metros de espessura gerou 21.000 m³/dia de gás. Ainda segundo os mesmos autores, os diabásios podem servir de rocha selante quando os diques se apresentam associados a soleiras de diabásio maciço.

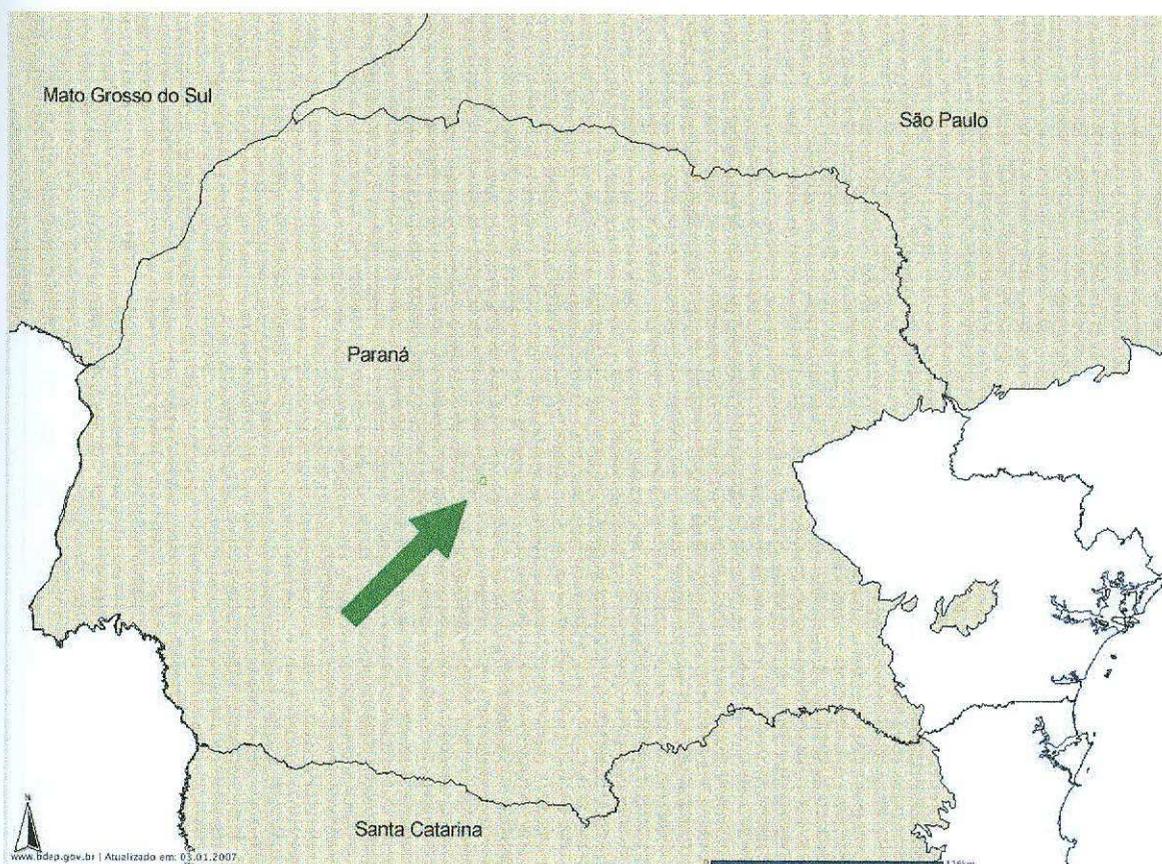


FIGURA 10: Campo de produção no centro do Estado do Paraná (assinalado em verde), segundo o BDEP (Via <http://www.bdep.gov.br>, acessado em fevereiro de 2007, modificado). Trata-se do campo de Barra Bonita, segundo informação verbal de BORGHI. Os dados do anuário estatístico da ANP (Via http://www.anp.gov.br/petro/dados_estatisticos.asp, acessado em fevereiro de 2007), entretanto, não mencionam a produção de óleo ou gás em terra no citado Estado. CAMPOS et al. (1998) também apontam a localização do campo de Barra Bonita no centro do Estado do Paraná.

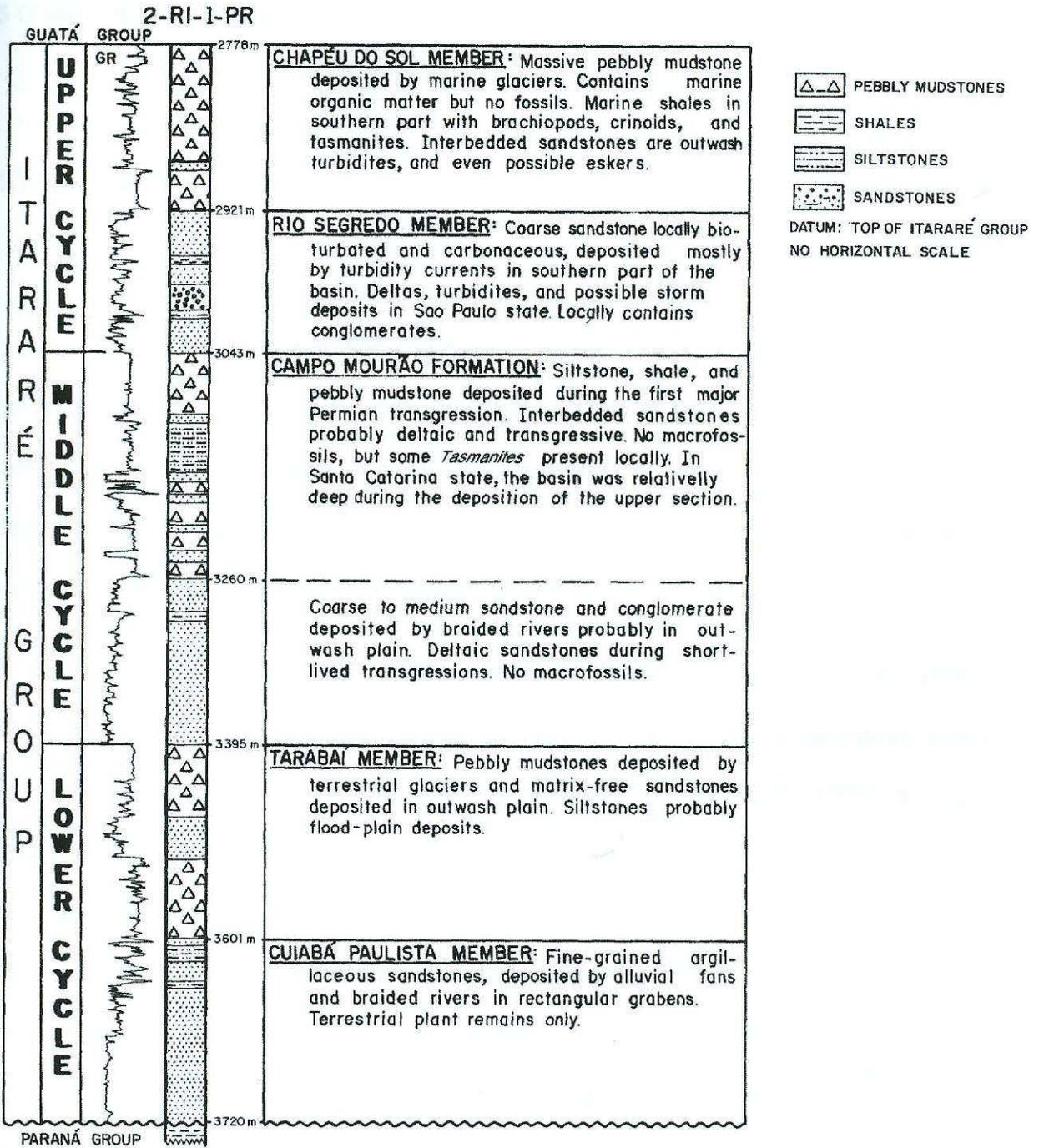


FIGURA 11: Ciclos deposicionais do Grupo Itararé, segundo FRANÇA & POTTER (1991).

5 O MÉTODO SÍSMICO

5.1 Introdução

O método sísmico consiste basicamente em utilizar as vibrações mecânicas naturais ou artificiais que se propagam pelo subsolo e analisá-las. Os terremotos naturais não são utilizados pela indústria petrolífera, servindo, entretanto, para determinar a natureza do interior do Planeta Terra (YILMAZ, 2001). O estudo dos terremotos naturais chama-se sismologia (DUARTE, 2003).

A sísmica pode ser de refração ou de reflexão (TELFORD *et al.*, 2004; FERNANDES, 1984). A primeira utiliza as ondas refratadas na interface entre duas camadas do subsolo com diferentes velocidades (FERNANDES, 1984) e é de aplicação limitada na indústria petrolífera, com exceção da correção estática, a qual será descrita mais adiante. A sísmica de reflexão aproveita a reflexão das ondas sísmicas nas interfaces entre camadas com diferentes impedâncias acústicas e é rotineiramente empregada na indústria petrolífera. Impedância acústica é o produto da velocidade da onda sísmica num meio pela densidade relativa deste meio (FERNANDES, 1984).

A idéia básica por trás da sísmica de reflexão é bastante simples: uma fonte de energia gera ondas mecânicas (vibrações) na superfície do terreno ou do mar, estas ondas se propagam em trajetória descendente até encontrarem uma interface na qual são parcialmente refletidas e parcialmente refratadas. A parte refratada avança na sua trajetória descendente até encontrar uma nova interface na qual será

novamente parcialmente refletida e parcialmente refratada. A parte refratada repetirá novamente o processo e assim se repetirá por dezenas ou centenas de vezes. A parte refletida de volta para a superfície é captada por sensores (geofones ou hidrofones) e são registrados o tempo e a intensidade de chegada destas ondas à superfície. Os registros assim obtidos são então processados e dali obtém-se informações sobre os refletores que geraram as reflexões.

Devido ao intenso uso do método sísmico na indústria petrolífera, existem diversas variações da técnica e o presente trabalho não pretende esgotar o tema.

Como o presente trabalho enfoca a bacia sedimentar do Paraná, a qual está localizada em terra, será dada ênfase à sísmica terrestre.

5.2 Aquisição sísmica

Aquisição é, nos levantamentos geofísicos, a operação do registro dos dados de campo (DUARTE, 2003).

A sísmica utilizada para encontrar petróleo utiliza fontes artificiais de energia, a saber: explosivos, vibradores e lançadores de pesos (geralmente chamados de thumpers) em terra (TELFORD *et al.*, 2004) ou canhões de ar (air guns) e de água (water guns) e variações destes equipamentos quando a aquisição é efetuada no mar (TELFORD *et al.*, 2004).

A forma mais comum de se trabalhar com explosivos consiste em abrir, com a ajuda de uma sonda, um furo com 8 a 10 cm de diâmetro e profundidade de alguns

metros, podendo chegar a 80 m ou mais. Coloca-se a carga juntamente com uma espoleta elétrica no fundo do furo. Um par de fios elétricos vai da espoleta até a superfície. Um detonador é utilizado para enviar uma corrente elétrica até a espoleta, a qual explode e detona o combustível principal (TELFORD *et al.*, 2004). Apesar de os explosivos serem a fonte de alta energia mais compacta que há, eles apresentam algumas desvantagens: alto custo, gasto de tempo e dinheiro para abrir os furos, potencial risco de danos a construções e mananciais próximos e restrições à localização de furos e locais de detonação (TELFORD *et al.*, 2004).

Quanto aos explosivos, existe ainda a técnica do air shooting. Trata-se de colocar o explosivo em varas 1 ou 2 m acima do solo e detoná-lo. Esta técnica causa poucos danos à vegetação mas pode ensurdecer os animais situados a 100 m ou menos do ponto de tiro (TELFORD *et al.*, 2004). Ainda, segundo os mesmos autores, existe uma outra técnica que consiste em fazer, com o auxílio de um arado especial, um sulco longo e raso (10 a 40 cm) no solo e neste introduzir os explosivos para a detonação.

Segundo DUARTE (2003), Thumper é uma fonte sísmica terrestre, da Mandrel Industries, na qual o pulso é gerado pela queda de um peso. O nome genérico, em inglês, para fontes sísmicas que funcionam por queda de peso, segundo a mesma fonte, é weight-dropping.

Vibroseis são caminhões equipados com um vibrador acoplado a uma placa, a qual fica apoiada sobre o terreno. Este equipamento gera pulsos (denominados de sweeps), os quais duram alguns segundos (TELFORD *et al.*, 2004), ou seja, um sweep tem duração muito maior do que o intervalo entre refletores (TELFORD *et al.*, 2004). Segundo DUARTE (2003), as reflexões somente se tornam perceptíveis após

a correlação do sinal registrado com o sinal gerado pelos vibradores. Uma das vantagens dos Vibroseis é que, por gerarem pulsos de baixa densidade energética, podem ser utilizados em áreas urbanas (TELFORD *et al.*, 2004).

Explosivos em profundidade são, sem exceção, mais potentes do que qualquer fonte de energia superficial para levantamentos sísmicos (TELFORD *et al.*, 2004).

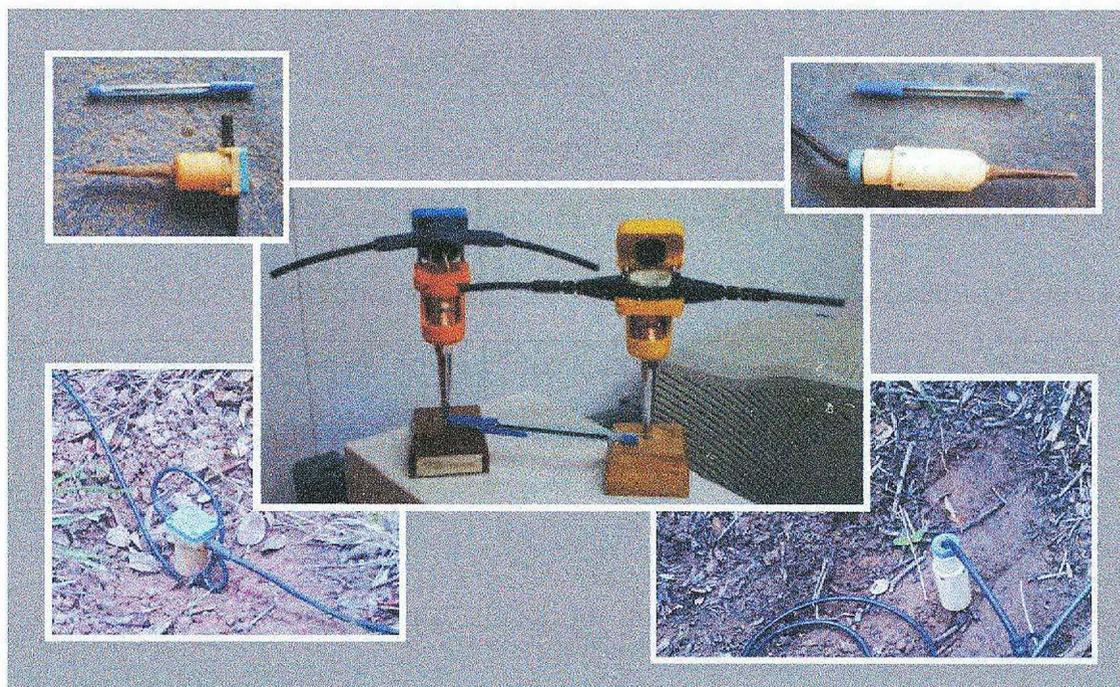


FIGURA 12: Geofones (montagem de fotos do autor). No alto à esquerda: geofone terrestre, o qual é indicado para locais secos. Embaixo à esquerda: geofone idêntico ao anterior, plantado no campo. No alto à direita: geofone de pântano, o qual é indicado para uso em locais alagados. Embaixo à direita: geofone idêntico ao anterior, plantado no campo. Ao centro: geofones abertos mostrando as bobinas.

A energia sísmica chegando na superfície terrestre é detectada por geofones (figura 12). Estes equipamentos costumam conter uma bobina e um ímã. Quando a onda sísmica chega a estes equipamentos, o ímã se move e a bobina tende a ficar parada por inércia. O movimento relativo entre ímã e bobina gera uma diferença de

potencial (voltagem) nesta última (TELFORD *et al.*, 2004). Um geofone típico registra apenas o movimento vertical porque a bobina pode mover-se em relação ao imã apenas verticalmente (TELFORD *et al.*, 2004). No Brasil costuma-se denominar a operação de posicionar os geofones no campo de plantar os geofones.

Existem basicamente 4 tipos de vibrações, doravante chamadas ondas, importantes em sismica: Ondas P, ondas S, ondas R e ondas L. As duas primeiras são importantes como sinal sísmico. As ondas R, por somente se propagarem na superfície do terreno, geram, em terra, o ground roll, o qual é prejudicial aos levantamentos sísmicos terrestres. Já as ondas L não costumam ser muito prejudiciais aos levantamentos sísmicos terrestres, isto porque não são geradas em grande quantidade pelas fontes sísmicas usuais e nem são registradas pelos geofones comumente utilizados (TELFORD *et al.*, 2004).

Os registros sísmicos são formados por conjuntos de traços, cada traço mostrando como o solo abaixo do grupo de geofones vibrou desde o instante da detonação (TELFORD *et al.*, 2004).

Os geofones costumam ser dispostos no campo em grupos denominados de arranjos. Cada arranjo se comporta como se fosse um geofone de grandes dimensões localizado no centro do grupo (TELFORD *et al.*, 2004). O sinal oriundo dos grupos de geofones vai para amplificadores, os quais aumentam a intensidade do mesmo e também realizam alguma filtragem (TELFORD *et al.*, 2004). A informação daí resultante costuma ser gravada em fitas magnéticas (TELFORD *et al.*, 2004).

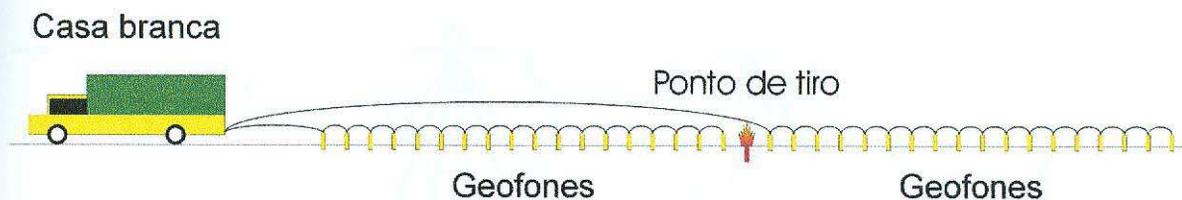


FIGURA 13: Disposição dos equipamentos para aquisição sísmica terrestre no campo (desenho do autor). Significado dos termos: Casa branca: caminhão no qual são gravados os dados sísmicos. Ponto de tiro: ponto no qual é detonada a carga explosiva. Obs: os cabos que ligam os geofones entre si e à casa branca costumam ficar dispostos diretamente sobre o solo.

Os equipamentos para a detecção da energia sísmica em levantamentos marítimos chamam-se hidrofones e funcionam com base em diferenças de pressão em cristais piezoelétricos (TELFORD *et al.*, 2004).

Segundo YILMAZ (2001), a sísmica de reflexão multicanal pode ser 2D (bidimensional) ou 3D (tridimensional).

A aquisição sísmica para sísmica de reflexão pode ser feita com cobertura contínua em 2D ou 3D (TELFORD *et al.*, 2004). Costuma-se fazer a aquisição de forma a poder aplicar-se a técnica CMP (common-midpoint, ou seja, técnica do ponto médio comum). Para tanto organiza-se as fontes de energia e os geofones de forma que não haja lacunas de cobertura e cada ponto refletor é registrado mais de uma vez, ou seja, há uma redundância de cobertura (TELFORD *et al.*, 2004). Uma das formas de se conseguir isto pode ser vista na figura 13. Reparar que as trajetórias assinaladas em azul claro e vermelho partem de pontos de tiro diferentes e são recebidas por geofones diferentes. Entretanto, amostram duas vezes os mesmos pontos em profundidade.

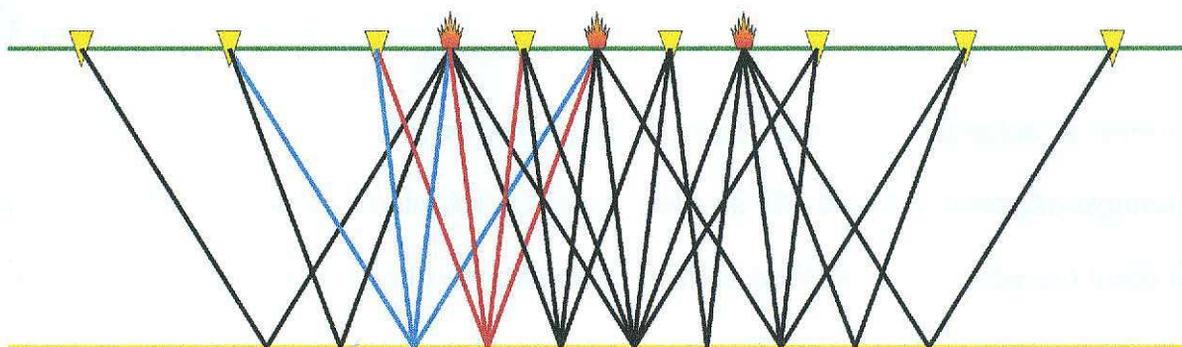


FIGURA 14: Exemplo de aquisição sísmica com redundância. Os pontos de tiro estão assinalados em cor alaranjada e os geofones em cor amarela. Desenho do autor baseado em TELFORD et al. (2004).

5.3 Resolução sísmica

A resolução sísmica depende do comprimento de onda utilizado. Quanto menor o comprimento de onda, maior a resolução. Tradicionalmente, considera-se a menor resolução vertical possível como sendo um quarto do comprimento de onda utilizado. A resolução horizontal é também proporcional ao comprimento de onda utilizado. Seria então aconselhável trabalhar-se com os menores comprimentos de onda (maiores frequências) possíveis para se obter a melhor resolução possível, caso não existisse um problema: quanto menor o comprimento de onda (maior frequência), maior a absorção da onda sísmica pelo meio no qual ela se propaga. Isto gera uma consequência: para o mapeamento de alvos rasos é possível obter-se boa resolução, enquanto que para objetivos profundos a resolução cai.

5.4 Razão sinal/ruído

Quando se efetua um levantamento sísmico, um dos aspectos a serem considerados é a razão sinal/ruído. O ruído, além de não trazer informação alguma, mascara o sinal. O ruído pode ser coerente, quando pode ser predito de um traço a outro, ou então incoerente, quando isto não ocorre (TELFORD *et al.*, 2004). O ruído pode ser reduzido por filtragem ou então por empilhamento do sinal (TELFORD *et al.*, 2004).

5.5 Processamento para sísmica de reflexão

DUARTE (2003) apresenta um esquema para o processamento sísmico:

- 1) Demultiplexação
- 2) Recuperação do ganho
- 3) Deconvolução dos efeitos instrumentais
- 4) Correção de absorção
- 5) Correção de divergência esférica
- 6) Ordenação em famílias CMP
- 7) Deconvolução preditiva
- 8) Atenuação de múltiplas
- 9) Análise de velocidade juntamente com correção de NMO
- 10) Correção de DMO

- 11) Empilhamento horizontal
- 12) Deconvolução após empilhamento
- 13) Migração após empilhamento
- 14) Filtro variável com o tempo
- 15) Filtro de coerência
- 16) Aplicação de ganho
- 17) Seção final

5.5.1 Demultiplexação

A demultiplexação consiste basicamente em reorganizar os dados de campo para que possam ser processados. Matematicamente, trata-se de transpor uma grande matriz de tal modo que as colunas da matriz resultante possam ser lidas como traços sísmicos gravados com diferentes afastamentos (offsets) mas com um ponto de tiro comum. Neste estágio os dados são convertidos para um formato que será utilizado durante o processamento. Um formato muito utilizado é o SEG-Y, estabelecido pela Society of Exploration Geophysicists (YILMAZ, 2001).

5.5.2 Recuperação do ganho

Processo pelo qual os dados registrados com ganho binário são transformados em um dos formatos operacionais de ponto fixo ou de ponto flutuante (DUARTE, 2003).

5.5.3 Deconvolução dos efeitos instrumentais

Tipicamente, a deconvolução pré-empilhamento consiste em comprimir matematicamente a onda sísmica de modo a formar um pulso, o qual é também chamado de spike (FIGURA 15). Isto traz como resultado o aumento da resolução temporal (YILMAZ, 2001).

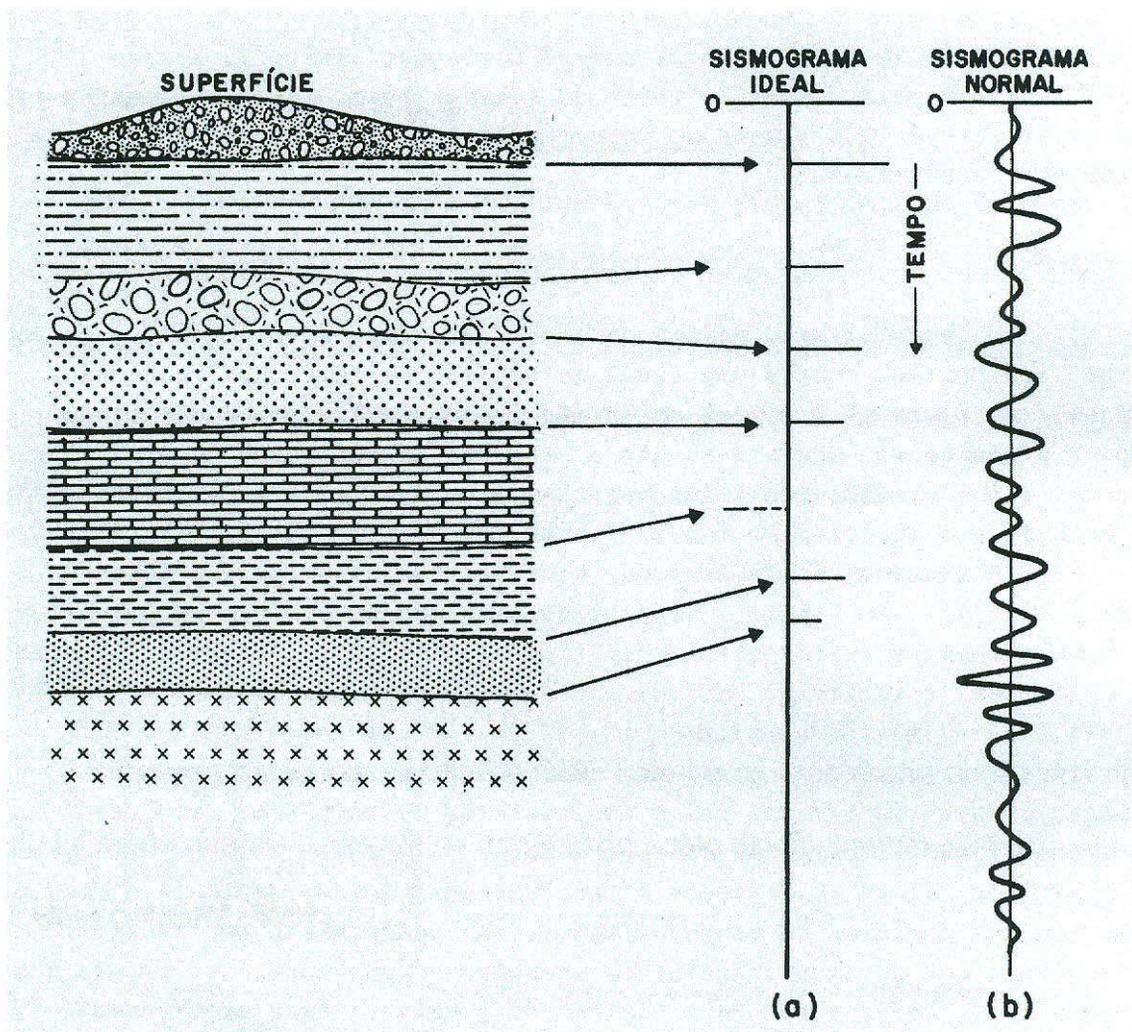


FIGURA 15: Conversão do sinal que chega aos receptores (sismograma normal) em um sismograma ideal por meio da operação de deconvolução (SILVA & VIANNA 1982)

5.5.4 Correção de absorção

A absorção é a atenuação da amplitude da onda causada pela transformação da energia ondulatória em calor (DUARTE, 2003). A correção deste efeito se resume numa série de filtragens em cascata sendo que, a cada filtragem, o ponto inicial da aplicação do processo ao traço sísmico é incrementado de uma amostra (DUARTE, 2003).

5.5.5 Correção de divergência esférica

Para um meio isotrópico e homogêneo, a amplitude da onda é inversamente proporcional à distância do ponto considerado à fonte de energia. Neste caso, para efetuar a correção, basta multiplicar a amplitude registrada por um fator proporcional ao tempo de reflexão. Para meios não homogêneos, a correção se torna mais complexa (DUARTE, 2003).

5.5.6 Ordenação em famílias CMP

A reorganização por família de CMP trata-se de uma rearrumação dos dados de tal modo que eles estejam no domínio do ponto médio comum (CMP na sigla em inglês) (YILMAZ, 2001).

5.5.7 Deconvolução preditiva

Trata-se uma deconvolução que emprega o filtro preditivo de Wiener-Hopf.

5.5.8 Atenuação de múltiplas

Existem diversas técnicas utilizadas para a atenuação de reflexões múltiplas. Estas técnicas são baseadas na periodicidade das mesmas ou na diferença entre as suas velocidades de NMO e a velocidade das reflexões primárias. Um dos métodos que exploram a periodicidade é a deconvolução. A transformada de Karhunen-Loeve, a transformada de Slant Stacking, a transformada Radon e a transformada $f-k$ são exemplos de ferramentas que podem ser utilizadas para a atenuação de reflexões múltiplas (YILMAZ, 2001).

5.5.9 Análise de velocidade juntamente com correção de NMO

A análise de velocidades: trata-se, como o próprio nome já indica, de determinar as velocidades das ondas sísmicas em subsuperfície a partir dos dados de reflexão sísmica (DUARTE, 2003).

A correção de NMO é feita partindo-se do pressuposto de que, para uma família de pontos CMP, o tempo gasto pela onda sísmica para completar o percurso da fonte ao refletor e deste ao receptor gera, quando traçado num gráfico, uma hipérbole (FIGURA 16). A citada correção remove o formato hiperbólico deste gráfico, colocando todas as reflexões oriundas de um mesmo CMP num segmento de reta horizontal. Esta correção é feita baseando-se na estimativa da velocidade da onda sísmica, a qual foi efetuada na etapa anterior (FIGURA 17) (YILMAZ, 2001).

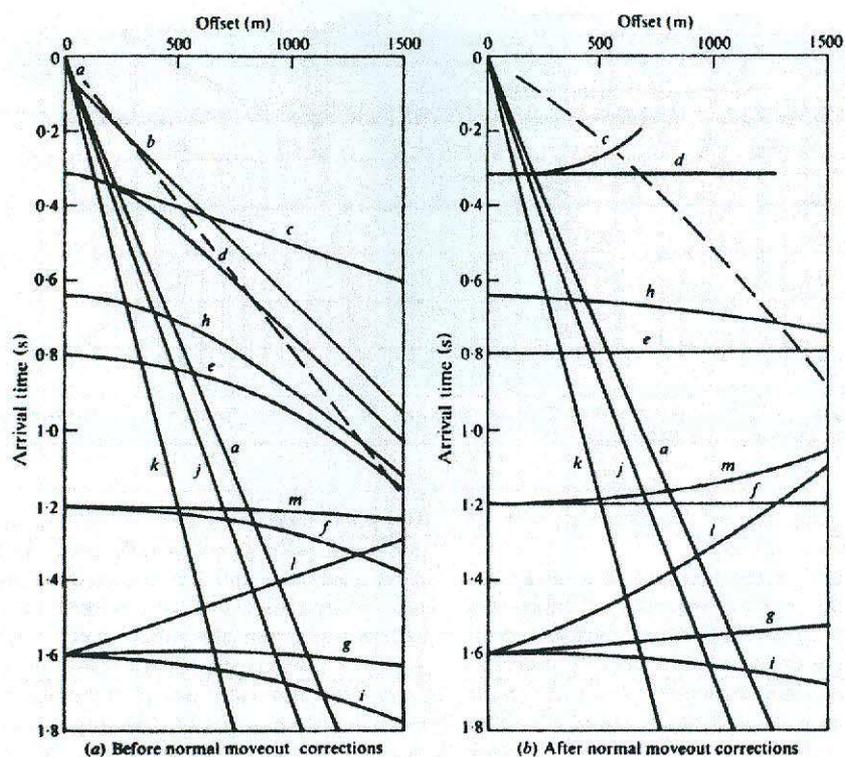


FIGURA 16: À esquerda: gráfico Offset (afastamento do receptor em relação ao ponto de tiro) versus tempo de chegada do sinal. Os eventos **d, e, f, g**, são reflexões primárias. Notar como na parte direita da figura, a qual apresenta o mesmo gráfico após a correção de NMO, as reflexões primárias são as únicas que ficam horizontais. Por causa disto, o empilhamento horizontal reforça as reflexões primárias e atenua os outros eventos (TELFORD et al., 2004).

5.5.10 Correção de DMO

A correção de DMO (DMO é da sigla em idioma inglês para Dip-Moveout) complementa a correção de NMO no sentido de tornar a correção da distância fonte-receptor independente dos mergulhos dos refletores (DUARTE, 2003).

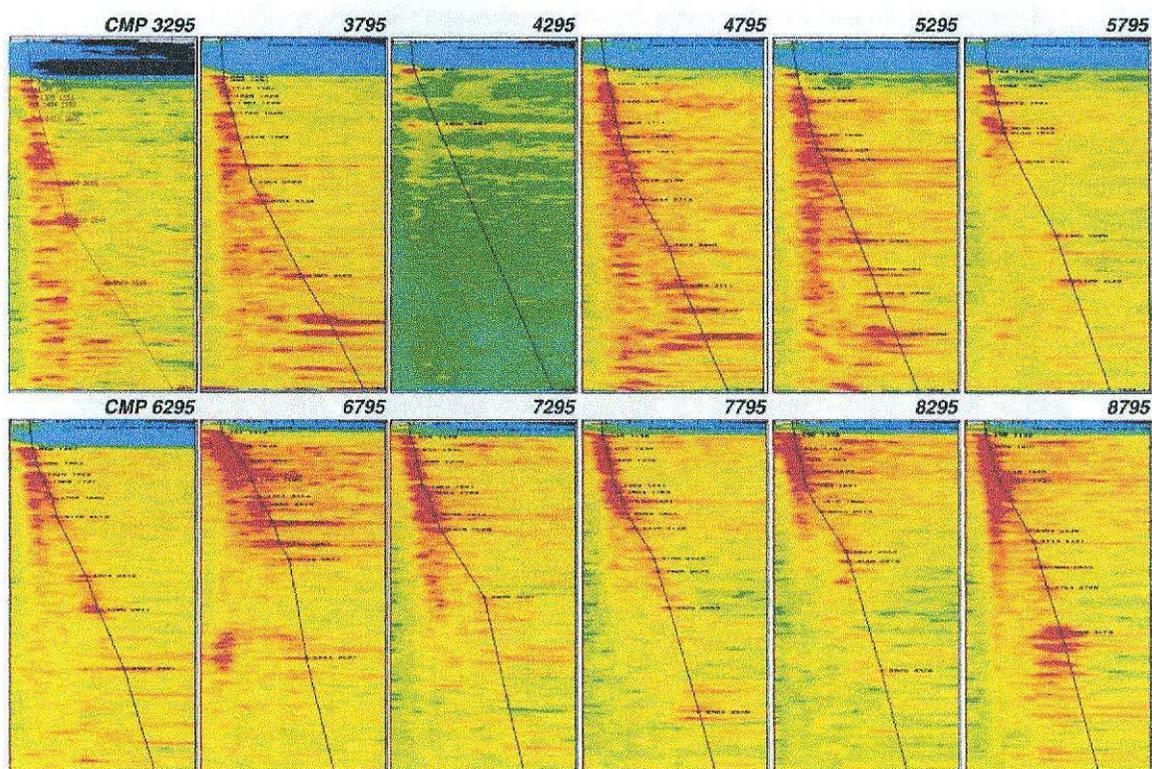


FIGURA 17: Análise de velocidades. O eixo vertical indica o tempo de chegada do sinal sísmico e o horizontal o sinal sísmico para cada um dos pontos comuns em profundidade selecionados. As regiões em cor vermelha indicam as zonas de maior coerência. Em preto, estão assinaladas as velocidades escolhidas com base na maior coerência (YILMAZ, 2001).

5.5.11 Empilhamento horizontal

Trata-se de sobrepor os traços CMP após efetuar a correção de NMO (FIGURA 18) (DUARTE, 2003).

5.5.12 Deconvolução após empilhamento

É aplicada aos dados depois do empilhamento horizontal. Geralmente é usada uma deconvolução preditiva (DUARTE, 2003). É aplicada usualmente para recuperar altas frequências que foram atenuadas pelo empilhamento horizontal.

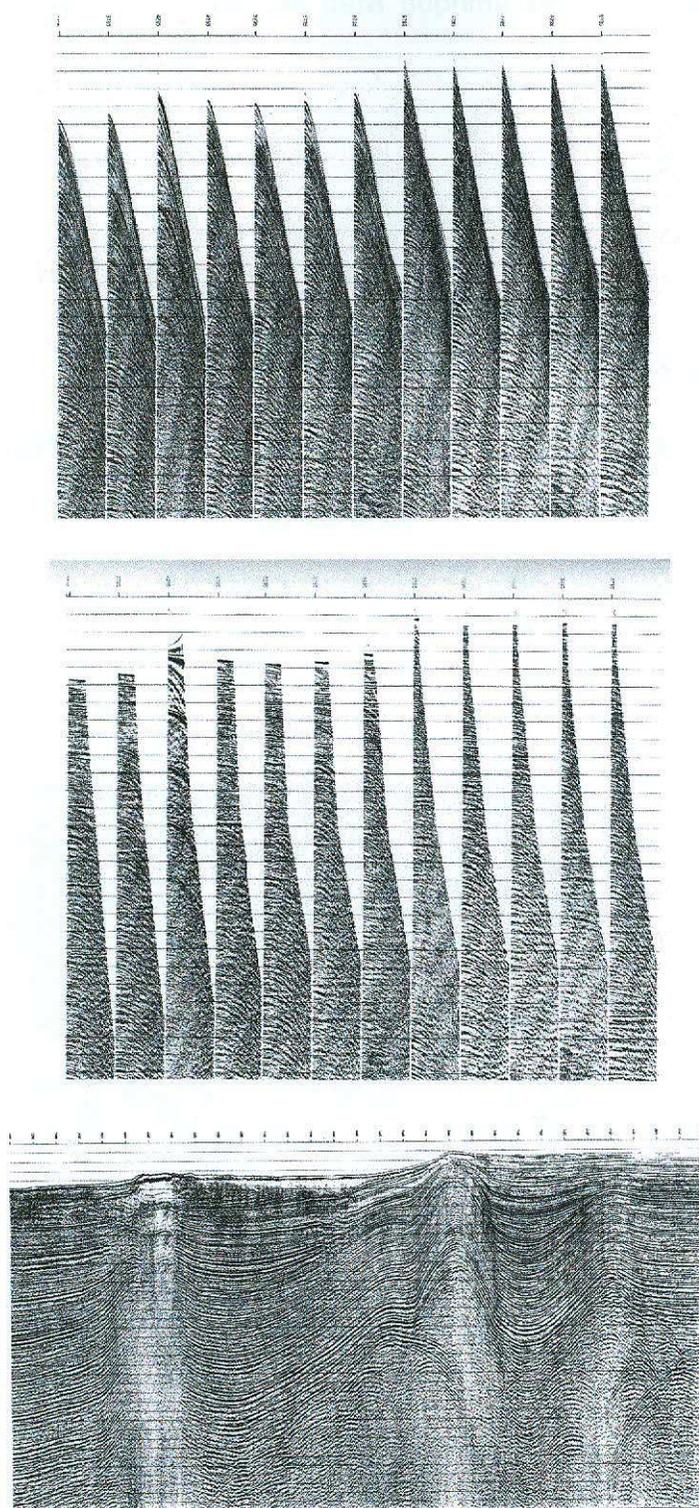


FIGURA 18: No topo: sismogramas antes da correção de NMO. No meio: os mesmos sismogramas após a citada correção. Embaixo: seção sísmica empilhada (Modificado de YILMAZ, 2001).

Também pode ser útil para suprimir reverberações e múltiplas de curto período (YILMAZ, 2001).

5.5.13 Migração após empilhamento

Trata-se da migração aplicada aos dados de reflexão sísmica após o empilhamento horizontal (DUARTE, 2003). Migração, por sua vez, é a operação por meio da qual o campo de onda registrado é transformado na imagem dos refletores (DUARTE, 2003).

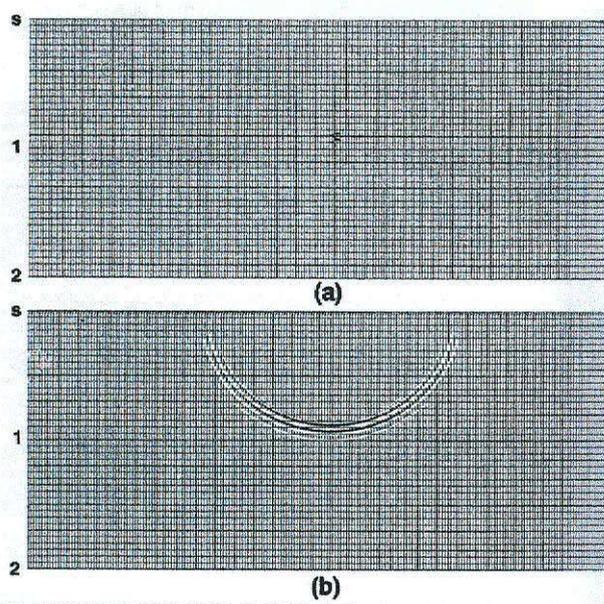


FIGURA 19: Exemplo de técnica de migração. Espalhar os dados em círculo (YILMAZ, 2001). O resultado pode ser visto na figura 20.

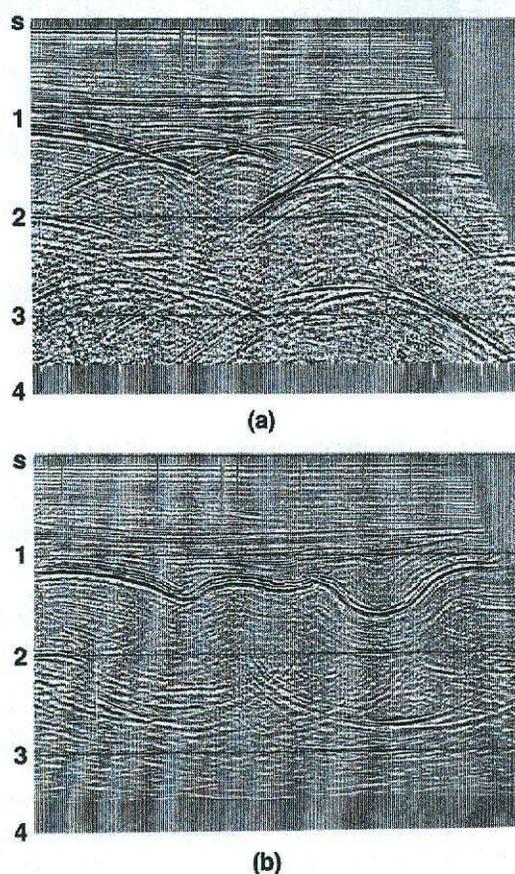


FIGURA 20: Topo: seção sísmica não migrada. Base: a mesma seção após a migração (YILMAZ, 2001).

5.5.14 Filtro variável com o tempo

Aplica-se um filtro cuja resposta impulsiva varia com o tempo (DUARTE, 2003). Segundo YILMAZ (2001), este filtro serve para remover ruídos no início e no final do espectro.

5.5.15 Filtro de coerência

A onda sísmica que é refletida por um determinado refletor, ao chegar a diferentes geofones, deverá gerar aproximadamente o mesmo efeito em cada um

dos mesmos. Por isto os traços sísmicos gerados a partir de cada receptor são muito semelhantes. Esta semelhança entre os traços sísmicos é chamada de coerência (TELFORD *et al.*, 2004).

Segundo DUARTE (2003), um filtro de coerência serve para separar os eventos coerentes dos não coerentes.

5.5.16 Aplicação de ganho

Ganho é a relação entre a magnitude do sinal de saída e a do sinal de entrada DUARTE (2003), ou seja, aplicar um ganho num dado sísmico é alterar a magnitude de um sinal sísmico.

5.5.17 Seção final

Tipicamente, a seção sísmica final trata-se de um corte vertical da geologia com a escala horizontal representada em distância e a vertical em tempo de reflexão (Duarte, 2003).

5.5.18 Correções estáticas

Apesar de não serem citadas no esquema das páginas 40 e 41, as correções estáticas também são muito importantes em se tratando de levantamentos sísmicos em áreas terrestres, como é o caso da bacia do Paraná.

Correções estáticas são as correções que envolvem um deslocamento constante dos dados em função do tempo de reflexão. Inclui as correções de

topografia e da camada de baixa velocidade, DUARTE (2003). São utilizadas em sísmica terrestre, o que é o caso da bacia sedimentar do Paraná.

5.6 Interpretação

A interpretação dos dados sísmicos demanda bons conhecimentos de geologia e a integração com todos os outros dados disponíveis sobre a região em estudo, especialmente poços. Segundo YILMAZ (2001), a interpretação sísmica envolve diversos procedimentos, tais como a marcação de refletores para a determinação das estruturas geológicas e análises de AVO (amplitude versus offset). Segundo DUARTE (2003), AVO (amplitude versus afastamento, em português) é uma técnica que permite inferir certas características das rochas a partir da variação das amplitudes das reflexões de acordo com o afastamento fonte-receptor.

Primeiramente procura-se por informação geológica que possa ser útil para iniciar a interpretação. Após reunir todos os dados eventualmente disponíveis além dos geológicos, deve-se assinalar na seção os refletores e eventuais estruturas, tais como falhamentos e dobras. Caso haja dados de poços, dever-se-á correlacioná-los com os dados da seção sísmica (FIGURA 21) utilizando um sismograma sintético, o qual vem a ser o cálculo de qual seria o sismograma que seria obtido caso uma onda sísmica atravessasse as litologias do poço (TELFORD *et al.*, 2004).

No caso da indústria do petróleo, torna-se importantíssimo assinalar na seção sísmica quais seriam as rochas geradoras e as rochas reservatório, além dos eventuais caminhos pelos quais o petróleo (ou o gás) eventualmente migrou de uma para a outra.

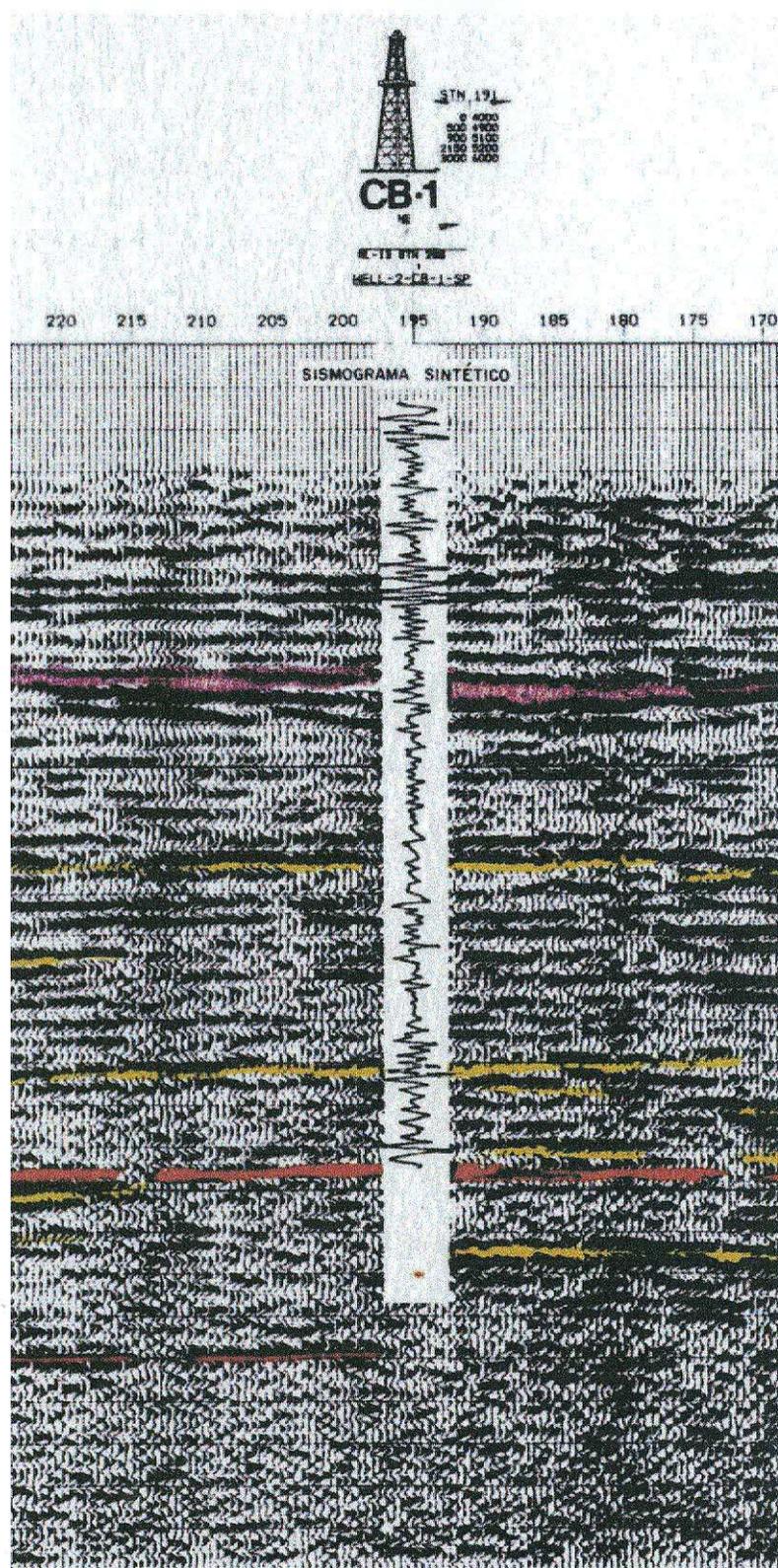


FIGURA 21: Exemplo da correlação de um poço com a seção sísmica. Já estão assinalados alguns refletores (modificado de SILVA & VIANNA 1982).

6 APLICAÇÃO DO MÉTODO SÍSMICO NA BACIA DO PARANÁ

Milani *et al.* (1990) mencionam que o Serviço Geológico e Mineralógico Brasileiro, o Conselho Nacional do Petróleo, o Governo do Estado de São Paulo e algumas companhias particulares fizeram pesquisas na bacia sedimentar do Paraná antes da criação da PETROBRAS em 1953. Após esta data, a PETROBRAS efetuou pesquisas na bacia do Paraná, chegando a, durante a fase dos contratos de risco (1979 a 1985), ocorrerem pesquisas da British Petroleum e do PAULIPETRO.

Segundo SILVA & VIANNA (1982), antes do PAULIPETRO iniciar os levantamentos sísmicos na bacia do Paraná, os resultados obtidos por este método não eram bons. A baixa qualidade sísmica era atribuída aos basaltos superficiais ou próximos à superfície e também às soleiras e aos diques de diabásio.

Segundo SILVA & VIANNA (1982), espessas camadas rasas de alta velocidade e/ou impedância acústica elevada funcionam como obstáculo à energia acústica emergente. Este é o caso dos basaltos na bacia sedimentar do Paraná.

Segundo SILVA & VIANNA (1982), o PAULIPETRO reprocessou antigas linhas sísmicas obtidas na bacia do Paraná e, após constatar uma grande melhora nos dados, realizou levantamentos sísmicos na mesma bacia utilizando seis equipes sísmicas (figura 22). Cinco usavam Vibroseis e uma outra fazia uso de dinamite como fonte de energia. Mesmo em áreas com cobertura de 1700 m de basalto estas equipes conseguiram bons resultados, conseguindo detectar refletores com profundidades de até quase 6.000 m (figura 23).

A equipe que utilizou dinamite como fonte sísmica também obteve bons resultados, conforme pode ser observado na figura 24 (SILVA & VIANNA, 1982). Nesta figura pode-se individualizar refletores a uma profundidade suficiente para distinguir-se o embasamento, mesmo sendo a espessura dos derrames basálticos de aproximadamente 900 metros.

6. 1 Parâmetros utilizados na aquisição

Segundo SILVA & VIANNA (1982), foram efetuados testes para a seleção dos parâmetros de campo, os quais são escolhidos provisoriamente. Efetua-se em seguida um processamento dos dados obtidos com estes parâmetros e escolhe-se então os parâmetros definitivos.

Para a seleção de parâmetros de campo, segundo SILVA & VIANNA (1982), além das características usuais, foram diferenciados três tipos de áreas:

- a) Com basalto aflorante sem alteração.
- b) Com basalto aflorante com zona de alteração.
- c) Basalto não aflorante, com cobertura sedimentar.

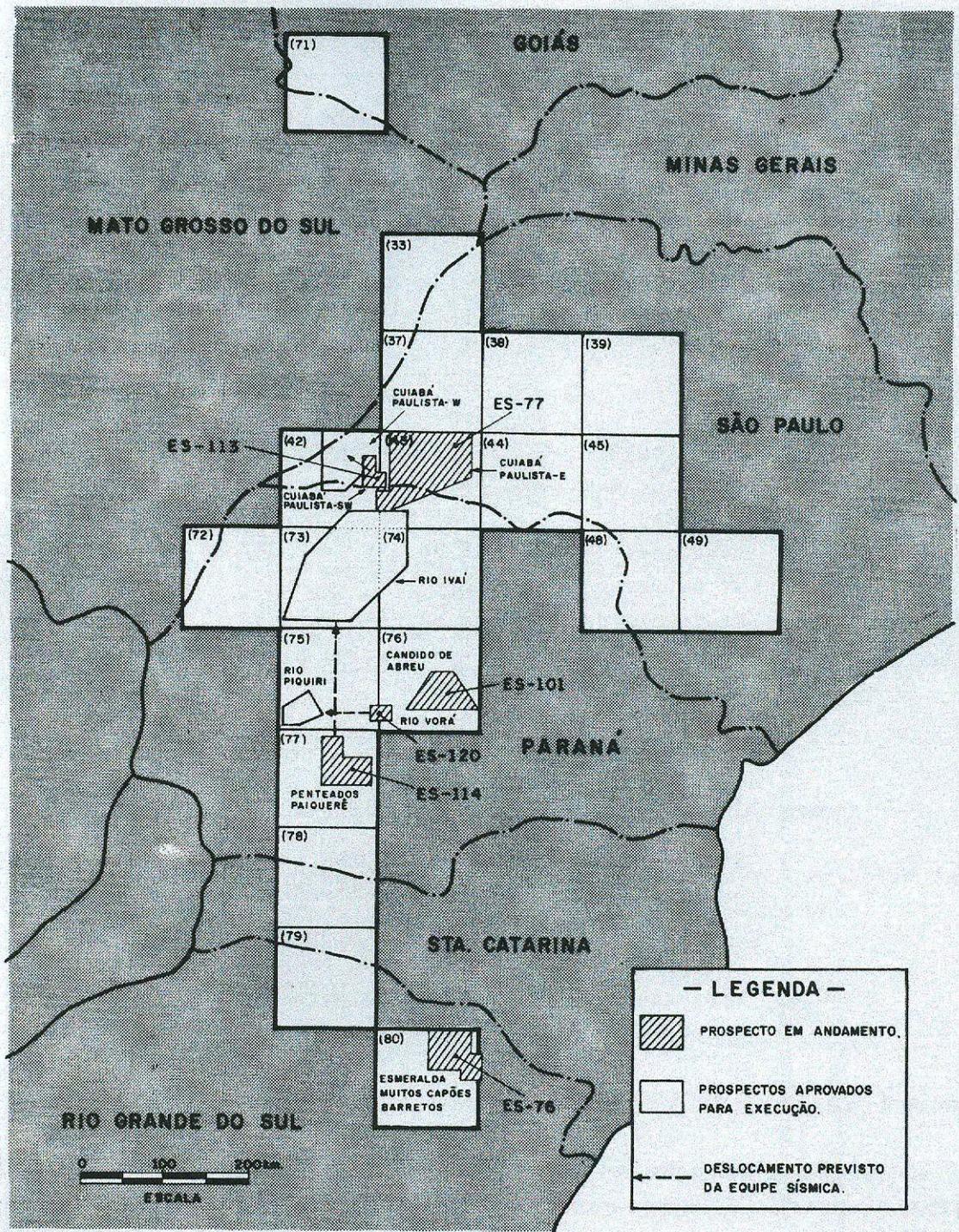


FIGURA 22: Localização das equipes sísmicas citadas no presente trabalho (SILVA & VIANNA 1982).

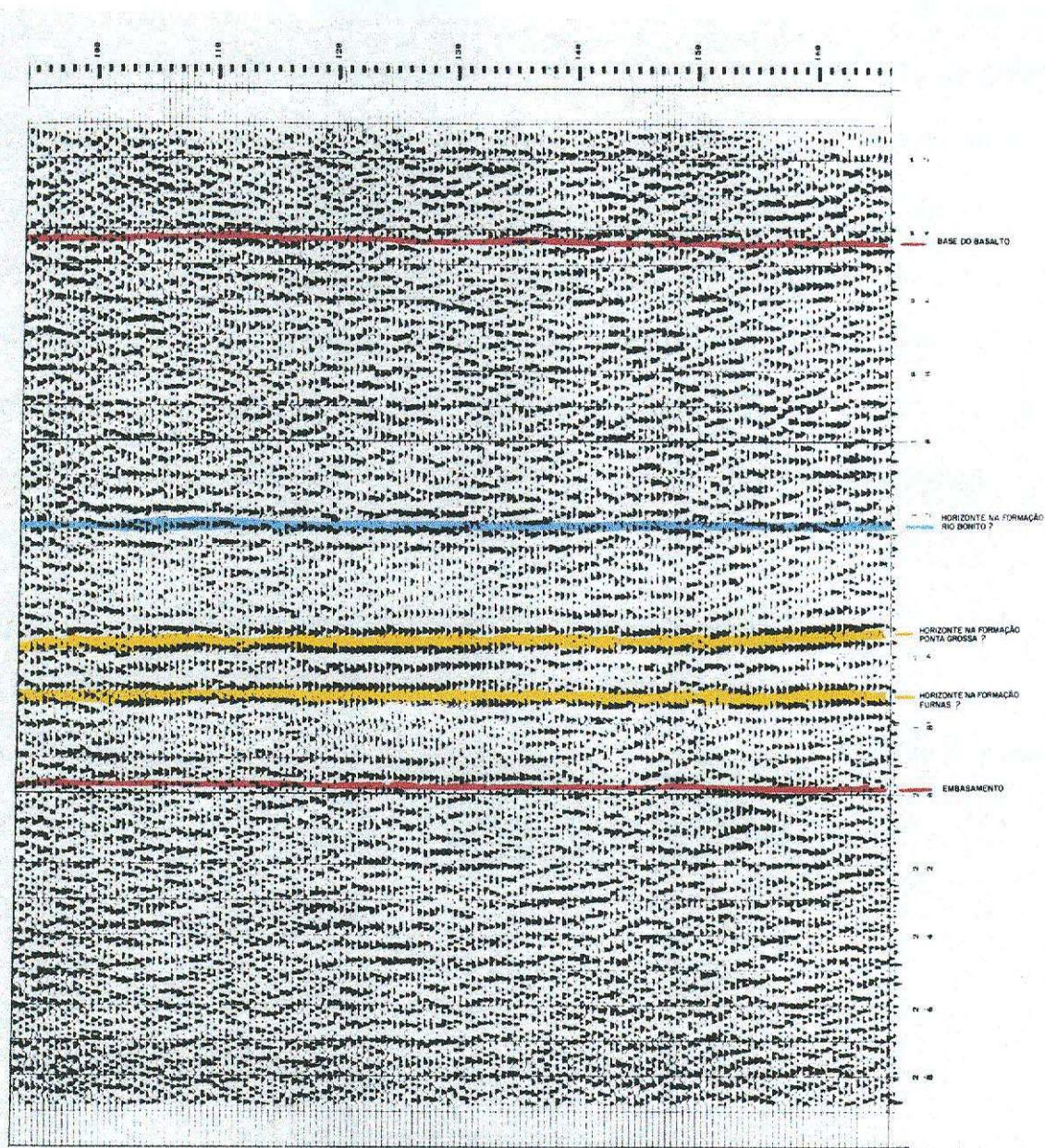


FIGURA 24: Linha sísmica obtida na área de Rio Vorá (bacia do Paraná) com o uso de dinamite. Reparar nos refletores visíveis abaixo do basalto (SILVA & VIANNA, 1982).

SILVA & VIANNA (1982) fornecem os parâmetros utilizados pela equipe que operava com dinamite. Dentre estes parâmetros é interessante notar que cada ponto de tiro tinha 16 furos e cada furo destes era carregado com 1 kg de gelatina sísmográfica, ou seja, a cada tiro eram detonados 16 kg de explosivos. A profundidade de cada furo era de 2 m ou o topo rochoso. Afora isto, havia 36 geofones por estação. Os mesmos autores também fornecem os parâmetros utilizados por uma das equipes que operavam com caminhões vibroseis. Esta equipe também utilizava 36 geofones por estação. Trata-se de uma carga de explosivos bastante elevada e de um grande número de geofones por estação.

6.2 Processamento

Segundo SILVA & VIANNA (1982), a seqüência de processamento dos dados foi a seguinte:

- 1) Demultiplexação dos dados
- 2) Correlação dos registros de campo filtrados
- 3) Recuperação de ganho
- 4) Filtragem
- 5) Deconvolução
- 6) Ordenamento dos pontos comuns em profundidade
- 7) Correções estáticas

- 8) Análise de velocidades
- 9) Empilhamento de distâncias comuns
- 10) Correções de NMO
- 12) Supressão das primeiras quebras
- 13) Correções estáticas consistentes superficiais
- 14) Empilhamento
- 15) Filtragem
- 16) Balanceamento dos traços
- 17) Aplicação de filtros de velocidade e coerência
- 18) Seção sísmica

Dentro da seqüência de processamento, SILVA & VIANNA (1982) consideraram que contribuíram muito para a melhora da resolução sísmica os passos que serão detalhados a seguir.

Foi utilizada uma correção estática melhor do que as correções efetuadas anteriormente. Antigamente era utilizada a técnica conhecida por uphole-survey (SILVA & VIANNA, 1982). Segundo DUARTE (2003) esta técnica consiste em furar um poço que ultrapasse a zona de baixa velocidade e detonar, dentro do mesmo, cargas a várias profundidades diferentes. Capta-se então os registros por meio de geofones situados em superfície e calcula-se então a espessura da zona de baixa velocidade. Segundo SILVA & VIANNA (1982), utilizou-se, durante os levantamentos efetuados pelo PAULIPETRO, o método da sísmica de refração para

determinar a espessura da zona de baixa velocidade. Detalhes sobre esta técnica podem ser obtidos em FERNANDES (1984). Segundo SILVA & VIANNA (1982), a vantagem do método das primeiras quebras é a amostragem com densidade de pontos bem mais elevada do que a obtida pelo método do uphole-survey. Isto é importante quando não se tem certeza sobre a regularidade do comportamento da zona de baixa velocidade, ou seja, uma vez melhor conhecida a zona de baixa velocidade, melhor serão corrigidos os seus efeitos.

SILVA & VIANNA (1982), tratando da deconvolução, mencionam "... o PAULIPETRO decidiu pela sua aplicação na rotina do processamento mesmo sendo dados terrestres...", ou seja, os dados anteriores ao levantamento efetuado pelo PAULIPETRO provavelmente não foram deconvolvidos. Este deve ser um fator importante para explicar a baixa qualidade dos dados sísmicos até então obtidos na bacia do Paraná. A melhora da qualidade da imagem causada pela deconvolução pode ser notada na figura 25.

As linhas sísmicas foram alinhadas preferencialmente nas direções Norte-Sul ou Leste-Oeste. A causa desta disposição são os falhamentos e diques, os quais apresentam direção principal NE/SW. Como os diques geram, em superfície, feições alongadas com topografia suave, posicionando-se as linhas sísmicas da forma citada, suaviza-se a topografia das mesmas.

6.3 Qualidade dos dados

Segundo SILVA & VIANNA (1982), a qualidade dos dados obtidos na bacia do Paraná pelo PAULIPETRO, em 3.000 km de linhas sísmicas, está assim distribuída:

Bons	55%
Regulares	20%
Deficientes	25%

SILVA & VIANNA (1982) consideram como sendo dados bons e regulares os que permitem identificar os refletores.

Tanto as linhas mostradas na figura 23 como a mostrada na figura 26 foram obtidas na região de Cuiabá Paulista, localidade na qual a espessura do basalto chega a 1700 m (SILVA & VIANNA 1982). Em ambas pode-se ver os refletores. Na figura 23 foram inclusive mapeados a base do basalto e o topo do embasamento. Isto significa que toda a coluna sedimentar está visível no perfil sísmico, apesar da espessura do basalto.

Ao observar-se as figuras deste capítulo, percebe-se que há pelo menos um quarto de século consegue-se imagear as rochas que estão por debaixo dos basaltos da bacia sedimentar do Paraná. É fato notório que desde então o

desenvolvimento dos computadores foi muito intenso, o que permitiu aperfeiçoar muito o processamento sísmico.

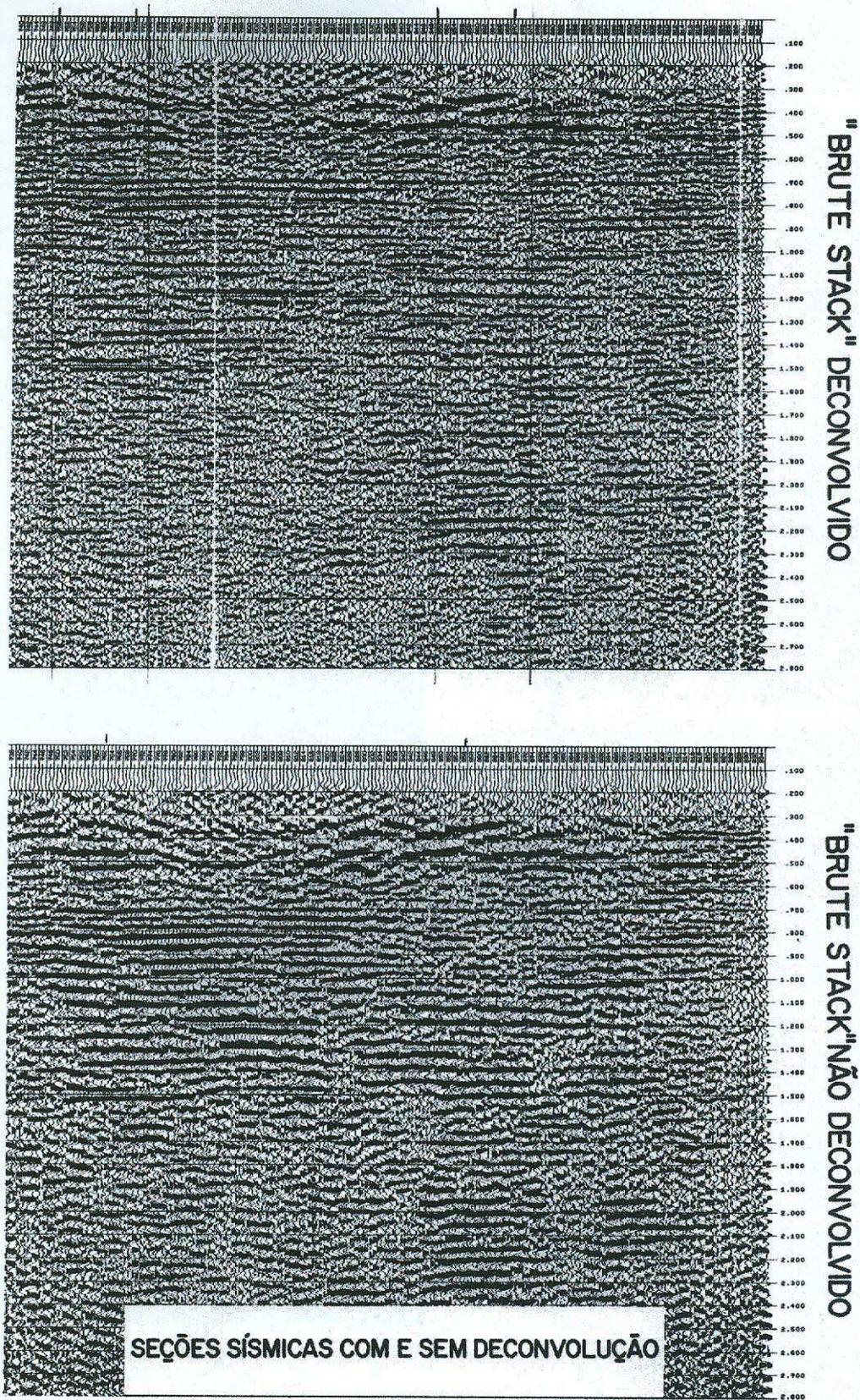


FIGURA 25: Seções sísmicas com e sem deconvolução. (SILVA & VIANNA, 1982).

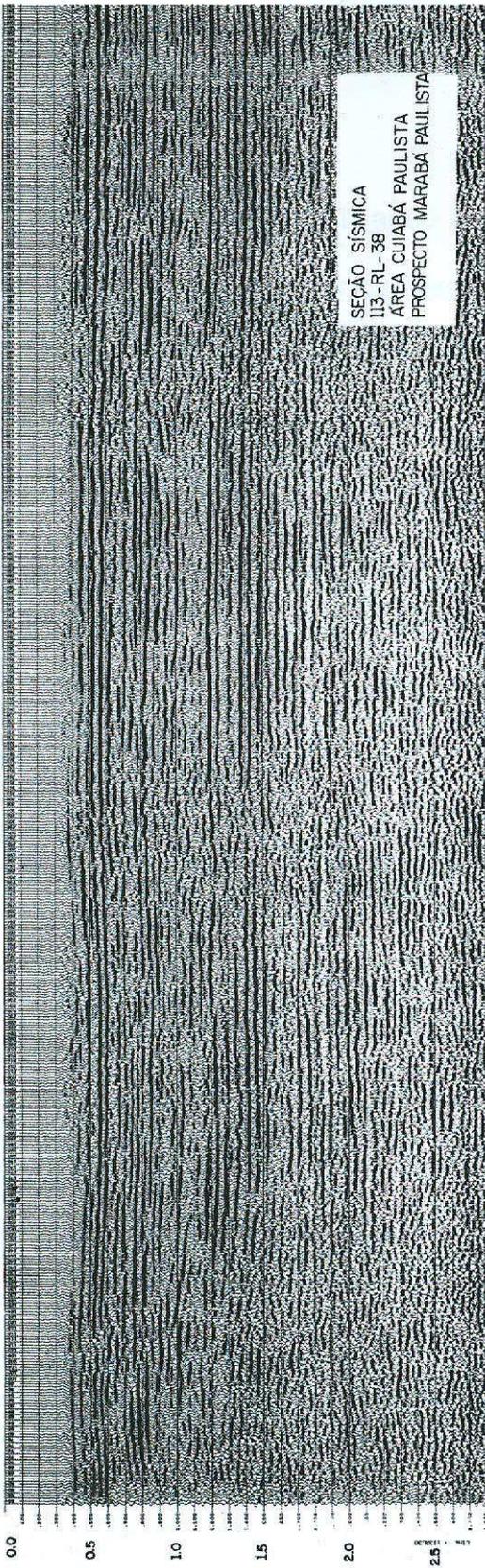


FIGURA 26: Linha sísmica obtida na região de Cuiabá Paulista, bacia do Paraná. Fonte: SILVA & VIANNA, 1982.

6.4 Sugestões para melhorar a resolução sísmica

NEPOMUCENO (1981) apud ANTUNES (1993), após estudar a amplitude e a frequência das ondas elásticas produzidas a partir de detonações de explosivos, chega às conclusões seguintes, entre outras:

- 1) Uma carga explosiva detonada em uma formação de baixa rigidez como, por exemplo, uma argila ou um folhelho, resulta em uma maior amplitude das reflexões do que se fosse detonada numa formação rígida como, por exemplo, um calcário.
- 2) Os tiros dados em calcário, o qual é um material de alta rigidez, são muito mais ricos em altas frequências do que os tiros dados num folhelho, o qual é um material de baixa rigidez.
- 3) Normalmente, quanto maior a profundidade do tiro, maior a energia observada nas altas frequências das reflexões.
- 4) O aumento da quantidade de carga provoca a concentração da energia nas baixas frequências.

Segundo TELFORD *et al.* (2004), os explosivos são mais potentes do que lançadores de projéteis ou caminhões Vibroseis, sem exceção. Segundo a mesma fonte, alguns explosivos apresentam velocidades de detonação, isto é, a velocidade com a qual a detonação avança dentro da carga, de cerca de 6 a 7 km/s, gerando pulsos bastante desejáveis do ponto de vista da análise da onda sísmica.

Conforme já fora mencionado no capítulo que trata do método sísmico, quanto menor o comprimento de onda, ou seja, quanto maior a frequência do sinal sísmico, melhor será a resolução obtida pelo método sísmico. Conforme já fora mencionado anteriormente, a equipe que trabalhava com explosivos utilizava em cada ponto de tiro 16 furos e cada furo era carregado com 1 kg de gelatina sismográfica, ou seja, a cada tiro eram detonados 16 kg de explosivos. A profundidade dos furos era de 2 m ou o topo rochoso. Afora isto, havia 36 geofones por estação.

A sugestão para aumentar a qualidade dos dados sísmicos obtidos sob os derrames basálticos da bacia do Paraná é:

1) Utilizar somente explosivos, porque são fontes sísmicas de alta potência quando comparados com caminhões Vibroseis.

2) Utilizar uma sonda mecanizada para fazer os furos para colocar os explosivos e enterrá-los alguns metros abaixo do topo do basalto fresco. Outra alternativa seria fazer um número muito maior de furos e carregá-los com uma quantidade ainda menor de explosivos por furo, tomando o cuidado de aumentar a quantidade total de explosivos. Por exemplo: 64 furos com 0,5 kg de explosivo cada, totalizando 32 kg. Qualquer uma destas alternativas aumentará a proporção de altas frequências no sinal sísmico. De qualquer modo, testes de campo serão necessários para determinar o número e o arranjo dos furos, assim como a quantidade de carga em cada um.

3) Utilizar uma quantidade ainda maior de geofones por estação, com o intuito de melhorar ainda mais a relação sinal-ruído.

4) Processar os dados assim obtidos com as melhores metodologias atualmente disponíveis.

O uso de uma sonda mecanizada aumentaria os custos, mas o aumento do número de furos também o faria. A escolha de um ou outro método deverá basear-se em critérios econômicos e ambientais. O aumento do número de geofones, quando comparado com as alterações na quantidade e disposição dos explosivos, acarretaria um muito pequeno aumento no custo. Por isto seria desejável um grande aumento no número de geofones por estação e, talvez, também um aumento no número de estações, ou seja, um menor intervalo entre estações.

O processamento sísmico melhorou muito desde a época em que o PAULIPETRO efetuou os seus levantamentos sísmicos. A causa disto foi o imenso aumento da capacidade de processamento dos computadores. Efetuando-se um bom processamento de um levantamento bem adquirido na bacia sedimentar do Paraná, obter-se-á dados de qualidade ainda melhor do que os obtidos pelo PAULIPETRO.

7 CONCLUSÃO

O método sísmico, do modo que foi aplicado à bacia do Paraná no início da década de 1980, não se mostrou capaz de revelar acumulações significativas, do ponto de vista econômico, de hidrocarbonetos. Passado um quarto de século desde a publicação do trabalho da PAULIPETRO, graças ao avanço da informática, é possível efetuar aquisições e processamentos sísmicos muito mais elaborados. Basta lembrar que as seções sísmicas apresentadas no presente trabalho não foram sequer migradas, enquanto que atualmente pode-se efetuar até migração pré-empilhamento. O número de canais utilizados na aquisição também aumentou. Isto traz como consequência uma melhor relação sinal-ruído, além de permitir a aquisição 3D. O estudo sobre as fontes sísmicas de alta resolução também indica meios de melhorar o sinal sísmico. Por isto, pode-se dizer que eventuais novas aquisições sísmicas na bacia do Paraná poderão gerar seções sísmicas muito mais detalhadas do que as obtidas até agora, além de dados tridimensionais, caso se faça uma aquisição 3D. Estes fatores todos somados podem levar à descoberta de acumulações de hidrocarbonetos economicamente interessantes na bacia do Paraná.

APÊNDICE A - NOÇÕES DE TEORIA DA ELASTICIDADE

Primeiramente serão definidos alguns termos:

1) *Stress* – Força por unidade de área. Em português também é chamado de esforço (DUARTE, 2003). Pode ser decomposto em esforço normal (*normal stress*), que é a componente normal a um determinado plano, e esforço tangencial (*shear stress*), que são as componentes tangenciais a este mesmo plano (YILMAZ, 2001).

2) *Strain* – Em português também é chamado de deformação (DUARTE, 2003). É a mudança de forma ou volume de um corpo induzida pelo esforço. É uma quantidade adimensional. A deformação que ocorre na direção do comprimento é chamada de *principal strain*; já a que é provocada por cisalhamento, rotação ou uma combinação destes fatores é chamada de *shear strain* (YILMAZ, 2001).

3) Deformação elástica – É a deformação de corpos sólidos que desaparece quando o esforço que a causa é eliminado (YILMAZ, 2001).

4) Lei de Hooke – A deformação elástica que ocorre num determinado ponto é diretamente proporcional ao esforço que é aplicado naquele local (YILMAZ, 2001).

5) Constantes elásticas:

a) Módulo de Bulk – É a razão entre o *stress* hidrostático e a deformação volumétrica. É, portanto, uma medida de incompressibilidade (YILMAZ, 2001).

b) Módulo de rigidez – É a razão entre *shear stress* e *shear strain*. É, portanto, uma medida de resistência ao *shear stress* (YILMAZ, 2001).

c) Módulo de Young – É a razão entre o *stress* longitudinal e o *strain* longitudinal associado a um cilindro que é submetido a uma distensão longitudinal na direção axial (YILMAZ, 2001).

d) Razão de Poisson – É a razão entre a contração lateral e a distensão longitudinal associada a um cilindro que é submetido a uma distensão longitudinal na direção axial. É um número adimensional (YILMAZ, 2001).

6) Ondas sísmicas – São ondas elásticas que se propagam dentro da Terra (YILMAZ, 2001).

7) Ondas P – São ondas cujo movimento das partículas é na mesma direção da propagação da onda (YILMAZ, 2001). O seu nome vem do fato de serem as primeiras a serem observadas em caso de terremotos (TELFORD *et al.*, 2004).

8) Ondas S - São ondas cujo movimento das partículas é perpendicular à direção da propagação da onda (YILMAZ, 2001). O seu nome vem do fato de serem as segundas a serem observadas em caso de terremotos (TELFORD *et al.*, 1990).

9) Reflexão – É o fenômeno que ocorre no campo de onda e é associado à fração da energia incidente que retorna após atingir uma interface que separa dois meios com constantes elásticas diferentes (YILMAZ, 2001).

10) Refração – É o fenômeno que ocorre no campo de onda e é associado à fração da energia incidente que, após atingir uma interface que separa dois meios com constantes elásticas diferentes, é transmitida para o meio seguinte (YILMAZ, 2001).

11) Difração – É o fenômeno que ocorre no campo de onda associado e é associado à energia que propaga para fora de uma descontinuidade acentuada em subsuperfície (YILMAZ, 2001).

As ondas S e P são denominadas de ondas de corpo por se propagarem no interior de corpos sólidos. Existem também as ondas Love e Rayleigh, as quais se propagam pela interface entre dois meios e são chamadas de ondas de superfície (YILMAZ, 2001).

Relação entre as constantes elásticas

Sendo:

Módulo de Young = E

Velocidade das ondas P= α

Razão de Poisson = σ

Velocidade das ondas S= β

Densidade relativa = ρ

Tem-se:

Constantes de Lamé:

$$\lambda = \frac{\sigma E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\sigma)}$$

Velocidades das ondas sísmicas:

Velocidade das ondas P:

$$\alpha = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} \quad (1)$$

Velocidade das ondas S:

$$\beta = \sqrt{\mu/\rho} \quad (2)$$

Relação entre as velocidades das ondas P e S:

$$\frac{\beta}{\alpha} = \sqrt{(1-2\sigma)/(2(1+\sigma))} \quad (3)$$

Lei de Hooke:

$$\text{Sendo } \Delta = E_{xx} + E_{yy} + E_{zz} = \frac{\delta u}{\Delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z}$$

$$\sigma_{ii} = \lambda' \Delta + 2\mu E_{ii} \quad i = x, y, z$$

$$\sigma_{ij} = \mu E_{ij} \quad i, j = x, y, z, i \neq j$$

Fonte das equações acima com exceção da lei de Hooke: YILMAZ (2001).

Fonte das equações da lei de Hooke: TELFORD *et al.* (2004).

A demonstração das equações das páginas anteriores não cabe no presente trabalho e pode ser vista em YILMAZ (2001) e em TELFORD *et al.* (2004).

As equações (1) e (2) mostram que a velocidade das ondas sísmicas que se propagam por um meio é inversamente proporcional à densidade relativa (ρ) do mesmo. Um bom exemplo é a halita, a qual apresenta densidade relativa de 1,8 e velocidade da onda P de 4500 m/s. Em muitos casos, entretanto, o aumento da densidade é acompanhado de um aumento da capacidade da rocha de resistir ao stress (YILMAZ, 2001). Baseado em experimentos de campo e laboratório, Gardner *et al.* (1974) apud YILMAZ (2001) deduziu a fórmula mostrada abaixo, sendo c uma constante que varia de acordo com o tipo de rocha. Esta fórmula é útil para estimar a densidade relativa a partir da velocidade sísmica da rocha. Esta fórmula costuma funcionar para diversas litologias, tais como: arenitos, folhelhos e carbonatos, porém não é válida com as anidritas (YILMAZ, 2001).

Fórmula de Gardner:

$$\rho = c \cdot 0,25$$

Para uma dada litologia, as velocidades sísmicas são influenciadas pela porosidade, pelo formato e pressão de poros, saturação de fluidos, pressão confinante e temperatura. É aceito que a pressão confinante, a qual é dependente do soterramento, é o fator que mais influencia as velocidades sísmicas (YILMAZ, 2001). A razão disto é que a pressão confinante acaba por reduzir a porosidade e, consegüentemente, a densidade relativa (ρ), aumentando α , segundo a fórmula acima.

Se por um lado a velocidade da onda P tomada isoladamente não serve para a determinação de litologias, esta velocidade associada à das ondas S pode ser útil para tal finalidade. A razão entre as velocidades das ondas S e P (β/α), a qual depende unicamente da razão de Poisson (vide equação 3), pode ser utilizada para identificar litologias com uma razoável precisão. Sedimentos inconsolidados ou rochas saturadas por fluidos possuem uma baixa rigidez e por isto uma elevada razão de Poisson (YILMAZ, 2001), ou seja, a razão α/β (inverso de β/α) é alta (YILMAZ, 2001).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP (Agência Nacional do Petróleo). Disponível em <http://www.anp.gov.br/>. Acesso em fevereiro de 2007.

ANTUNES, Paulo de Tarso Silva. **Fontes Sísmicas Para Alta Resolução**. 1993. 129 p. Dissertação (Mestrado em geofísica) – Programa de Pós-graduação em geofísica, Observatório Nacional, Rio de Janeiro

ARAÚJO, C. C. de; Yamamoto, J. Kazuo; Rostirolla, S. P., *Arenitos asfálticos na Bacia do Paraná: estudo das ocorrências no Alto Estrutural de Anhembi*, B. Geoci. Petrobras, **14** (1): 47-70, Rio de Janeiro, nov. 2005/maio 2006.

Artur, P. C. & SOARES, P. C., *Paleoestruturas e petróleo na Bacia do Paraná*, Revista Brasileira de Geociências, **32** (4): 433-448, dezembro de 2002.

ASSINE, M.L., SOARES, P.C., MILANI, E.J. Seqüências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da bacia do Paraná. **Revistas Brasileiras de Geociências**, **24:77-89**, 1994.

BDEP (Banco de Dados de Exploração e Produção) Disponível em <http://www.bdep.gov.br/>. Acesso em fevereiro de 2007.

BORGHI, Leonardo. *Fácies, arquitetura deposicional, tempestitos e o Devoniano da bacia do Paraná*. Rio de Janeiro, 2002. 309f. Tese de Doutorado (Geologia) - Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002.

Campos, L. de; MILANI, E.; Toledo, M.; Queiroz, R.; Catto, A.; Selke, S., *Barra Bonita: a primeira acumulação comercial de hidrocarboneto da Bacia do Paraná*, IBP, 1998.

DUARTE, Osvaldo de Oliveira. *Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica, 2003, 352 p.

FERNANDES, Carlos Eduardo de Moraes. Fundamentos de Prospecção Geofísica, Rio de Janeiro: Interciência, 1984, 190 p.

FRANÇA, Almério Barros; POTTER, Paul Edwin. Stratigraphy and Reservoir Potential of Glacial Deposits of the Iatraré Group (Carboniferous-Permian), Paraná Basin, Brasil. In: The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 1991, v.75 N° 1.(1991)

HAWKESWORTH, C., J. *et al.*, Tectonic Controls on Magmatism Associated with Continental Break-Up: An Example from the Paraná Etendeka Province in Earth and Planetary Science Letters. Elsevier, 2000

MILANI, Edison José; Araújo, Laury Medeiros de. **Recursos Minerais Energéticos: Petróleo** Energy Mineral Resources: Petroleum In: BIZZI, L. A. *et al.* **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Texto, Mapas & SIG** Geology, Tectonics and Mineral Resources of Brazil Text, Maps & Gis. Brasília: CPRM, 2003. 674 p.

MILANI, E. J. *et al.* Bacia do Paraná: Possibilidades Petrolíferas da Calha Central. In: **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, 4:21-34, jan./mar., 1990.

MILANI, E.J., FRANÇA, A.B., SCHNEIDER, R.B. Bacia do Paraná, **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, 8:69-82, jan./mar., 1994.

MILANI, E. J. & Ramos, V. A., *Orogenias paleozóicas no domínio sul-ocidental do Gondwana e os ciclos de subsidência da Bacia do Paraná*, Revista Brasileira de Geociências, **28**(4): 473-484, dezembro de 1998.

MILANI, E. J & ZALÁN, P. V, *An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America*, Episodes, IUGS (Int. Union of Geological Sciences) Ottawa, vol.22, n° 3, p. 199-205, Sep. 1999.

PETRI, Setembrino, FÚLFARO, Vicente José. Geologia do Brasil. São Paulo: T.A. Queiroz, Editor, 1988. 634 p.

Quintas, L. C. L., Mantovani, M. S. M., ZALÁN, P. V. Contribuição ao Estudo da Evolução Mecânica da Bacia do Paraná in Revista Brasileira de Geociências, junho de 1999.

Santos, E. L. *et al.* Os Escudos Sul-Riograndense e Catarinense e a Bacia do Paraná In: SCHOBENHAUS, Carlos. **Geologia do Brasil**: Brasília: DNPM, 1984. 501 p.

SILVA, Gildo Rodrigues, VIANNA, Aplicabilidade do Método de Reflexão Sísmica na Bacia do Paraná In PAULIPETRO, **Geologia da Bacia do Paraná** Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonatos. São Paulo: 1982, 198 p.

TELFORD, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. Applied Geophysics. 2^a ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004, 770 p.

YILMAZ, Özdogan, Seismic Data Analysis, Tulsa (Estados Unidos da América do Norte), Society of Exploration Geophysicist, v.2, 2001

YOSHIDA, Riuiti, GAMA Jr, Ercílio. Geologia da Bacia do Paraná: Reavaliação da Prospectividade em Hidrocarbonatos In PAULIPETRO, **Geologia da Bacia do Paraná** Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonatos. São Paulo: 1982, 198 p.

ZALÁN, P. V.; Wolff, S.; Conceição, J. C. J.; Astolfi, M. A. M.; Vieira, I. S.; Appi, V. T.; Zanotto, O. A., *Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná*, In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 3, Curitiba, PR, 1987, Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 441-477.

ZALÁN, P. V. *et al.* Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná in Atas do III simpósio Sul-Brasileiro de Geologia v. 1, Sociedade Brasileira de Geologia, Curitiba, 1987

Zalán, P.V., Wolff, S., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Conceição, J.C.J., Appi, V.T., Neto, E.V.S., Cerqueira, J.R., Marques, A. (1991), The Paraná Basin, Brazil. In: Leighton, M.W., Kolata, D.R., Oltz, D.F., Eidel, J.J. (eds.), Interior cratonic basins. Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, p.681-708. (Memoir 51)